



Universidade de Aveiro Departamento de Geociências

Ano 2016

**RAFAEL SANTOS
BAIETA**

**CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL DE SOLOS
POR MÉTODOS ELÉTRICOS E SÍSMICOS**



**RAFAEL SANTOS
BAIETA**

**CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL DE SOLOS
POR MÉTODOS ELÉTRICOS E SÍSMICOS**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, realizada sob a orientação científica do Doutor Fernando Ernesto Rocha de Almeida, Professor Associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

o júri

Presidente

Prof. Doutor Jorge Manuel Pessoa Girão Medina
professor auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Carlos Rodrigues
professor coordenador do Instituto Politécnico da Guarda

Prof. Doutor Fernando Ernesto Rocha da Almeida
professor associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

agradecimentos

O presente trabalho não teria sido possível sem o contributo do Professor Fernando Almeida cujo auxílio se revelou indispensável.

O Instituto Politécnico da Guarda também se mostrou disponível e sem este não teria sido possível completar o trabalho, nomeadamente o Professor Carlos Rodrigues.

palavras-chave

Solos subsaturados, teor em água, porosidade, índice de vazios, geofísica, sísmica, ondas P, velocidade, resistividade elétrica, geotecnia, consolidação, parâmetros geotécnicos.

Resumo

O presente trabalho consiste no estudo da variação da resistividade, da velocidade das ondas P e do assentamento numa experiência em que se faz variar o grau de saturação num solo arenoso com silte e argila dentro dum tanque com 1.3m^3 sendo metade cheio com amostra e outra metade livre para se poder variar o nível freático. Obtêm-se relações entre as variáveis mencionadas a várias profundidades ao longo do tempo, durante a saturação e, no final, numa situação drenada. Complementam-se os resultados com um ensaio edométrico preparado para fazer leituras de resistividade aquando o aumento de carga.

Conclui-se que a resistividade e a velocidade diminuem com o aumento do grau de saturação e classifica-se o solo como colapsável em virtude do assentamento registado. Também se conclui que em profundidade a resistividade aumenta por consolidação do solo e a velocidade diminui devido ao aumento do grau de saturação que, em torno, descrese os parâmetros geotécnicos.

Keywords

Unsaturated soils, water content, porosity, void index, geofisics, seismic, P-waves, velocity, eletrical resistivity, geotecnics, consolidation, geotechnical parameters.

Abstract

The work done consists in the study of the variation of resistivity, P-wave velocity and the settlement in an experiment where the water content changes in a sandy soil with silt and clay placed inside a half-filled tank with 1.3m^3 , where the empty side is used to control the water level. Relationships between the mentioned variables for different depths, and in time, are obtained, during saturation and drainage situations. The obtained results are improved with an edometric test prepared for resistivity measurements while stress is applied. It is concluded that the resistivity and the velocity decrease with the increase in water content and the soil is classified as collapsible due to the observed settlement. It is also concluded that, with depth, resistivity increases and velocity decreases. Finally, it is understood that resistivity increases with soil settlement.

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Objetivos.....	1
1.2.	Organização da Tese.....	1
2.	Enquadramento Teórico	3
2.1.	Parâmetros e conceitos geofísicos	3
2.1.1.	Geofísica componente sísmica	3
2.1.2.	Eletrorresistividade	4
2.2.	Parâmetros e conceitos mecânicos	8
2.2.1.	Coeficiente de Poisson	8
2.2.2.	Módulo de Rigidez	8
2.2.3.	Módulo de Young	8
2.2.4.	Módulo Volumétrico	8
2.2.5.	Teoria das pequenas deformações	9
2.2.6.	Grau de Saturação, S e Teor em água, w.....	9
2.2.7.	Estados do solo quanto ao teor em água	10
2.2.8.	Tensão capilar atuante no solo	12
2.2.9.	Potencial capilar	14
2.2.10.	Sucção da água no solo	15
2.2.11.	Compactação nos solos	16
2.2.12.	Ensaio Proctor normal e Proctor modificado	18
2.2.13.	Ensaio edométrico	19
2.2.14.	Solos colapsáveis e expansivos.....	20
2.3.	Relação das ondas sísmicas com os parâmetros geotécnicos.....	22
2.3.1.	Coeficiente de Poisson	22
2.3.2.	Módulo de Rigidez, G	23

2.3.3.	Módulo de Young, E	23
2.3.4.	Módulo Volumétrico, K	24
3.	Estado da arte.....	25
4.	Ferramentas de Aquisição	39
4.1.	DAQ 39	
4.2.	Labview e formato .vi.....	39
4.3.	TANAGRA – Data Mining Software.....	40
4.4.	Geofones	41
4.5.	Resistivímetro.....	42
4.6.	Elétrodos	42
4.7.	Defletómetro.....	43
4.8.	Edómetro.....	43
5.	Materiais & Métodos.....	45
5.1.	Solo.....	45
5.2.	Tanque (características)	46
5.3.	Sistema de aquisição - Sísmica (Circuito Utilizado).....	49
5.4.	Sistema de Aquisição – Elétrica (Circuito Utilizado).....	50
5.5.	Sistema de medição do assentamento	51
5.6.	DAQ (Características)	51
5.7.	Programação da VI	51
5.8.	Aquisição dos dados	53
5.9.	Processamento em MatLab.....	54
5.9.1.	O script	55
5.9.2.	Limitações do Programa.....	57
5.10.	Correlações em TANAGRA.....	58
6.	bDados e Resultados	61
6.1.	Montagem	62

6.2.	Primeira secagem	62
6.3.	Primeiro humedecimento	62
6.3.1.	Elétrica.....	63
6.3.2.	Sísmica.....	64
6.3.3.	Defletómetro	65
6.4.	Sequência de humedecimentos e estabilizações	66
6.4.1.	Elétrica.....	66
6.4.2.	Sísmica.....	67
6.5.	Ensaio edométrico.....	68
7.	Interpretação dos Resultados.....	71
7.1.	Montagem.....	71
7.2.	Secagem	72
7.3.	Primeiro humedecimento	73
7.3.1.	Resistividade.....	73
7.3.2.	Velocidades	76
7.3.3.	Defletómetro e absorção da água.....	77
7.3.4.	Correlações.....	79
7.3.5.	Porosidade e Grau de Saturação a partir de Velocidades P e Resistividade	81
7.4.	Sequência de humedecimentos e estabilização.....	84
7.4.1.	Resistividade.....	84
7.5.	Ensaio edométrico.....	87
7.6.	Justificação do comportamento sísmico e resistivo.....	89
8.	Conclusões.....	93
9.	Bibliografia.....	95
Anexos		0
10.1.	Anexo 1 – Ficheiro de Aquisição em <i>Labview</i>	i
10.2.	Anexo 2 – Função “picking_2d”	ii

10.3.	Valores de Resistência Medidos.....	iv
10.3.1.	Montagem.....	iv
10.3.2.	Primeira secagem.....	iv
10.3.3.	Primeiro humedecimento	iv
10.3.4.	Sequência de humedecimentos e estabilizações.....	vi
10.3.5.	Edômetro.....	vii

Índice de Figuras

Figura 1 – Ondas P Fonte: (Rafael, 2009)	4
Figura 2 – Ondas S Fonte: (Rafael, 2009)	4
Figura 3 - Curva de Degradação de G.....	9
Figura 4 - Modelo dos vários estados de solo quanto ao grau de saturação. Adaptado de (Rakotomalala, 2005)	10
Figura 5 - Solo seco.....	11
Figura 6 - Solos subsaturados.....	11
Figura 7 - Solo saturado.....	11
Figura 8 - Comparação dum solo submerso com um saturado e exemplificação da força de "empuxo". Retirado de (Fosco, s.d.)	12
Figura 9 - Esquema simplificado do efeito da capilaridade nos maciços terrosos. Adaptado de (Fernandes, 2012)	13
Figura 10 - Água retida por capilaridade entre duas partículas. Retirado de (Fernandes, 2012)....	13
Figura 11 - Ilustração da atuação das forças coesivas (adaptado de (Libardi, 1993)).....	15
Figura 12 - Curva de compactação destacando a densidade seca máxima, o teor em água e a curva de 100% de saturação. Adaptado de (Villar, Guimarães, Rodrigues, Azevedo, & Carvalho, 2015) .	16
Figura 13 - Teoria de Hogentogler (1937) para explicar a forma da curva de compactação. Adaptado de (Villar, Guimarães, Rodrigues, Azevedo, & Carvalho, 2015)	17
Figura 14 - Aparelho edométrico. À esquerda - vista exterior; à direita corte da célula edométrica. Retirado de (Sequinel, 2016).....	19
Figura 15 - Representação dum ensaio edométrico. Retirado de (Vallejo, 2004)	20
Figura 16 - Representação esquemática das argilas do grupo da montemorilonite (tipo 2:1) - Retirado de (Alvarez, s.d.)	21
Figura 17 - Diagrama dos coeficientes de Poisson em função de V_s/V_p contra V_s/V_R	23
Figura 18 - Teor em água contra velocidade das ondas P. Retirado de (Baieta, 2015)	25
Figura 19 - Teor em água contra o coeficiente de Poisson. Retirado de (Baieta, 2015).....	25
Figura 20 - Módulo de Rigidez no tempo. Retirado de (Baieta, 2015).....	25
Figura 21 - Teor em água contra velocidade das ondas S - Retirado de (Baieta, 2015).....	25
Figura 22 - Módulo Volumétrico no tempo. Retirado de (Baieta, 2015)	25
Figura 23 - Módulo de Young no tempo. Retirado de (Baieta, 2015)	25
Figura 24 - Velocidades P e S; a cheio em condições de sobreconsolidação por dessecação e a tracejado em condições de sobressaturação. Retirado de (Baieta, 2015).....	26

Figura 25 - Parâmetros G e E; a cheio em condições de sobreconsolidação por dessecação e a tracejado em condições de sobressaturação. Retirado de (Baieta, 2015)	26
Figura 26 - G0 como função de e.	27
Figura 27 - Velocidade versus pressão para o arenito Massilon seco, parcialmente saturado e totalmente saturado. Retirado de (Bastos, 93).....	28
Figura 28 - Procedimento de estimativa de conteúdo argiloso e porosidade. Utilizado apenas para sedimentos não saturados e não consolidados. Retirado de (Konishi & Hashimoto, 2016)	30
Figura 29 - Secção de velocidade de ondas S, em cima e secção de resistividade, em baixo. Retirado de (Konishi & Hashimoto, 2016).....	31
Figura 30 - Avaliação do conteúdo em argila e porosidade das medições de ondas S e resistividade usando os modelos. adaptado de (Konishi & Hashimoto, 2016)	31
Figura 31 - Secções de conteúdo em argila estimado (no topo), porosidade (no meio) e vulnerabilidade (em baixo). O log do SPT está respresentado na figura de baixo e correpondem ao local avaliado mais vulnerável. Retirado de (Konishi & Hashimoto, 2016)	32
Figura 32 - Exemplos de diagramas de velocidade e condutividade como um função de porosidade e grau de saturação para dois valores de coeficiente de Poison. (Cosentini & Foti, 2014)	35
Figura 33 - Velocidades medidas em laboratório com diferentes gr+aus de saturação. (Cosentini & Foti, 2014)	36
Figura 34 - Diagrama de velocidade-condutividade com dados experimentais. (Cosentini & Foti, 2014)	37
Figura 35 – DAQ da National Instruments Fonte: (ARM - The Architecture for the digital world, s.d.).....	39
Figura 36 - Geofones utilizados.....	41
Figura 37 - Resistivímetro utilizado.....	42
Figura 38 - Eléetrodo de corrente Figura 39 - Eléetrodo de Potencial	42
Figura 40 - Defletómetros (à esquerda mecânico e à direita elétrico (LVDT)) e conversor do defletómetro elétrico.....	43
Figura 41 - Malha condutora aplicada na câmara (à esquerda); Câmara de PVC com eléctrodos na lateral (centro); Ensaio edométrico com medição de resistividade (à direita).....	43
Figura 42 - Análise granulométrica do solo utilizado.....	46
Figura 43 - Colocação do eléctrodo de corrente (à esquerda); Colocação do primeiro geofone (à direita).....	47
Figura 44 - Geometria do tanque da direita para a esquerda (visto do lado de traz do tanque)	47

Figura 45 - Tanque utilizado nos ensaios	48
Figura 46 - Instrumento de aquisição de coordenadas x e z.....	48
Figura 47 - DAQ, pilha, martelo e ferro utilizados no circuito.....	49
Figura 48 - Circuito utilizado na sísmica. (G=Geofone)	49
Figura 49 - Eléctrodo de corrente Inferior.	50
Figura 50 - Eléctrodos de potencial, esquerda; de corrente, direita.	50
Figura 51 - Bloco Diagrama da VI	52
Figura 52 - Pannel frontal da VI	52
Figura 53 - Posições de tiro (a vermelho).....	53
Figura 54 - Ilustração simples da tomografia	54
Figura 55 - Geometria do problema (Bolas azuis - geofones; asteriscos verdes – Tiros).....	55
Figura 56 - Picking das primeiras chegadas.....	56
Figura 57 - Representação da matriz das frações das distâncias	56
Figura 58 - Tiro 1, posição A (à esquerda); Tiro 24, posição A (à direita).....	57
Figura 59 - Velocidades em regime pouco húmido (à esquerda); Velocidades em regime muito húmido (à direita).....	58
Figura 60 - Diagrama usado em TANAGRA.....	59
Figura 61 - Eigen Values - TANAGRA	59
Figura 62 - Factor Loadings – TANAGRA.....	60
Figura 63 – Diagrama de dispersão em TANAGRA.....	60
Figura 64 - Resistividades - Montagem	71
Figura 65 - Resistividades – Secagem.....	72
Figura 66 - Resistividades - Primeiro humedecimento (190h)	73
Figura 67 - Resistividades - Primeiro humedecimento (Primeiras 5h).....	74
Figura 68 - Resistividades - Primeiro humedecimento (5-190h).....	75
Figura 69 - Velocidades - Primeiro Humedecimento (190 horas)	76
Figura 70 - Velocidades - Primeiro humedecimento (Primeiras 5h)	76
Figura 71 - Velocidades - Primeiro humedecimento (5-190h)	77
Figura 72 - Água absorvida	78
Figura 73 - Dados do defletómetro	78
Figura 74 - Assentamento vs. absorção	79
Figura 75 - Diagrama de dispersão - Todos os dados - 1º Ensaio.....	80

Figura 76 - Diagramas de dispersão – à esquerda, queda de resistividade; à direita, aumento de resistividade	81
Figura 77 - Primeiro diagrama calculado por (Cosentini & Foti, 2014) com dados de velocidade P e resistividade	82
Figura 78 - Segundo diagrama calculado por (Cosentini & Foti, 2014) com dados de velocidade P e resistividade.	83
Figura 79 - Resistividades – sequência.....	84
Figura 80 - Valores de resistividade antes e depois da drenagem projetados contra a profundidade.....	86
Figura 81 - Ensaio Edométrico - Assentamento vs. Carga.....	87
Figura 82 - Ensaio Edométrico - Assentamento vs. Resistividade.....	88
Figura 83 - Ensaio Edométrico - Assentamento vs. Resistividade - (assentamento 4.5-8mm).....	88
Figura 84 - Vários estágios de saturação do solo	89
Figura 85 - Resistividade e Velocidade das ondas P, contra a profundidade, em vários períodos da experiência. Ante-ensaio sendo exatamente antes de se colocar água, Final ensaio 1 no final do primeiro ensaio e Drenagem sendo os últimos valores medidos	94

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Resistividade e condutividade de alguns minerais e rochas (Aktarakçi, 2008) e (Telford, Geldart, & Sheriff, 1990)	6
Tabela 2 - Ordem de grandeza da altura de ascensão capilar nos solos. Adaptado de (Fernandes, 2012).....	14
Tabela 3 - Ensaio Proctor (E197-1966 LNEC)	18
Tabela 4- Parâmetros da Lei de Archie, equação de van Genuchten e equação (a do gráfico) usados para desenhar o diagrama velocidade-condutividade na Figura 22. Retirado de (Cosentini & Foti, 2014).....	34
Tabela 5 – Parâmetros apropriados para a Lei de Archie, a equação de van Genuchten e para a equação (a segunda) para as amostras laboratoriais. (Cosentini & Foti, 2014)	37
Tabela 6 - Peneiros – Massas medidas e calculadas.	45
Tabela 7 - Geometria variável dos elétrodos em metros.....	61
Tabela 8 - Resistividades (Ωm) - Montagem	62
Tabela 9 - – Resistividades (Ωm) – Primeira Secagem.....	62
Tabela 10 - Resistividades (Ωm) - Primeiro Humedecimento	63
Tabela 11 – Velocidades (m/s) - Primeiro Humedecimento	64
Tabela 12– Deslocamento – Primeiro Humedecimento	65
Tabela 13 - Resistividades (Ωm) – Segundo e posteriores humedecimentos.	66
Tabela 14 - Velocidades (m/s) – Segundo e posteriores humedecimentos.....	67
Tabela 15 – Edômetro – Carga (kPa), assentamento (mm) e resistividades (Ωm).....	68
Tabela 16 – Resistências (Ω) - Montagem.....	iv
Tabela 17 – Resistências (Ω) – Primeira secagem	iv
Tabela 18 - Resistências (Ω) – Primeiro humedecimento	iv
Tabela 19 – Resistências (Ω) – Segundo e posteriores humedecimentos	vi
Tabela 20 - Edômetro – Carga (kPa), assentamento (mm) e resistências (Ω).....	vii

Abreviaturas e símbolos

SI – Sistema Internacional;

P, ondas P – ondas volumétricas ou primárias;

S, ondas S – ondas de cisalhamento ou secundárias;

R, ondas R – ondas superficiais Raleigh;

V_p – velocidade das ondas P;

V_s – velocidade das ondas S;

G – módulo de Rigidez;

G_s – módulo de Rigidez efetivo;

K – módulo volumétrico;

K_s – módulo volumétrico efetivo;

E – módulo de Young;

ν – coeficiente de Poisson;

λ – primeiro parâmetro de Lamé;

S – grau de saturação do solo;

ω – teor em água do solo;

ω_{ot} – teor em água ótimo;

d – densidade;

ϕ – porosidade;

e – índice de vazios;

σ – condutividade;

σ_f – condutividade do fluido;

σ_w – condutividade do eletrólito;

R – resistência elétrica;

ρ – resistividade elétrica do solo;

ρ_f – resistividade elétrica do fluido;

ρ_w – condutividade elétrica do fluido;

ρ_0 – resistividade duma rocha apenas preenchida com água (S=1);

ρ_{areia} – resistividade elétrica da areia;

ρ_{argila} – resistividade elétrica da argila;

I – índice de resistividade;

γ – massa específica;

γ_{max} – massa específica máxima;

A – área;
T – tensão;
P – pressão;
l – comprimentos;
V – volume;
 V_{arg} – conteúdo volumétrico de argilas;
 V_w – volume de água;
 V_s – volume da fração sólida;
 V_v – volume de vazios;
 P_w – peso da água;
 P_s – peso da fração sólida;
VI – virtual instruments;
x, y, z – coordenadas geométricas;
M, N, A, B – posição dos elétrodo;
h – altura;
 h_c – altura capilar da água;
 ϵ_{lat} – deformação lateral;
 ϵ_{long} – deformação longitudinal;
 Ψ – matriz de sucção;
F – Fatores;
a, b, m, n – constantes, variadas.

1. Introdução

Este documento foi elaborado no âmbito da finalização do mestrado em Engenharia Geológica na Universidade de Aveiro, sendo apresentado como dissertação final. Aborda as áreas de geofísica e geotecnia.

Um solo é um ambiente extremamente dinâmico e, neste trabalho, estuda-se como essa dinâmica funciona em subidas de níveis freáticos em solos arenosos com componente argilosa. Faz-se isto usando métodos sísmicos e elétricos em profundidade. As conclusões tiradas podem ser aplicadas a qualquer solo semelhante, mas tem uma relevância especial em aterros.

1.1. Objetivos

Este projeto tem seis objetivos principais:

1. Caracterizar o comportamento dinâmico do solo, determinando a velocidade das ondas P e da resistividade, num perfil vertical ao longo do tempo durante o processo de absorção capilar de água;
2. Estudar correlações entre o teor em água, as velocidades das ondas P e a resistividade do solo;
3. Estudar como o solo reage à sua humificação usando um defletómetro para medir assentamentos;
4. Compreender e explicar a mecânica dos efeitos observados;
5. Relacionar os dados obtidos com outros na bibliografia existente;
6. Projetar trabalhos futuros de complementação.

1.2. Organização da Tese

O projeto está dividido em dez capítulos.

No primeiro capítulo introduz-se o trabalho e enumeram-se os objetivos que se pretendem alcançar.

No segundo capítulo faz-se uma introdução teórica onde se explicam alguns conceitos que se devem conhecer antes de ler este trabalho. Estes conceitos incluem aspetos físicos, geotécnicos e informáticos.

No terceiro capítulo expõem-se trabalhos prévios realizados, por outros autores, relevantes à compreensão e interpretação deste trabalho.

No quarto capítulo identifica-se e explica-se o funcionamento das ferramentas usadas na aquisição de dados.

No quinto capítulo tenta-se expor toda a experiência. Quais os materiais e os métodos utilizados e porquê. Explica-se também todo o processo de aquisição.

No sexto capítulo são apresentados os resultados obtidos.

No sétimo capítulo faz-se a discussão e análise dos resultados apresentados no quinto capítulo. É neste capítulo que se faz todo o tratamento de resultados e os cálculos necessários para alcançar os objetivos descritos no primeiro capítulo.

No oitavo capítulo apresentam-se as conclusões retiradas durante todo o processo e propõem-se trabalhos futuros.

No nono capítulo, na bibliografia, estão apresentadas todas as fontes utilizadas na elaboração do projeto.

No décimo capítulo são apresentados, em anexo, os dados, sob a forma de tabelas, *scripts* e um ficheiro de aquisição Labview que não se considerou necessário colocar noutros capítulos, mas que possam ser úteis à leitura deste documento.

2. Enquadramento Teórico

Neste capítulo pretende-se esclarecer alguns conceitos utilizados durante o trabalho, nomenclaturas e expor a teoria útil à compreensão do mesmo.

2.1. Parâmetros e conceitos geofísicos

Estudos geofísicos, nomeadamente sísmica e elétrica, são um grande componente deste trabalho que lidam com os parâmetros físicos resistividade e velocidade de propagação de ondas.

2.1.1. Geofísica componente sísmica

Em geofísica, no método sísmico estuda-se a propagação de ondas acústicas no solo. Estas ondas ao se propagarem através da matéria solicitam os materiais nas pequenas deformações e, nesse sentido, entre os métodos geofísicos, este é muito requerido na engenharia civil. A propriedade que se utiliza é a impedância acústica que, nada mais é, que a dificuldade que qualquer onda mecânica possui em se propagar num meio físico calculável através do produto da velocidade das ondas pela densidade dos materiais. Variações bruscas de impedância sísmica implicam uma reflexão e refração das ondas com absorção de energia ao longo da sua propagação.

Usando este princípio na sísmica de reflexão e refração, medindo os tempos de chegada das ondas, sejam refletidas ou refratadas, é possível obter uma imagem do subsolo, em que se consegue observar diferentes zonas com diferentes propriedades. Este tempo de chegada também é interessante porque é possível, para um mesmo solo, ao longo do tempo, obter diferentes resultados, alterando as suas propriedades. Neste trabalho estuda-se a variação da velocidade das ondas P para diferentes teores em água.

2.1.1.1. Tipos de ondas sísmicas medidas

Existem dois tipos de ondas sísmicas, as que se propagam num volume (ondas P e ondas S) e as que se desenvolvem na interface entre dois meios (ondas Rayleigh e Love).

As ondas P, ou primárias, têm essa denominação porque têm uma velocidade de propagação superior às das S, ou secundárias. São ondas longitudinais que fazem os meios vibrar em paralelo com a direção de propagação. O movimento que se verifica num modelo será uma contração seguida de uma distensão com períodos e amplitudes baixas. Fazem com que os solos sofram uma variação de volume. No ar, estas ondas propagam-se à velocidade do som (330m/s), na água a 1450m/s e, como exemplo de um meio sólido, num granito têm-se velocidades na ordem dos 5000m/s.

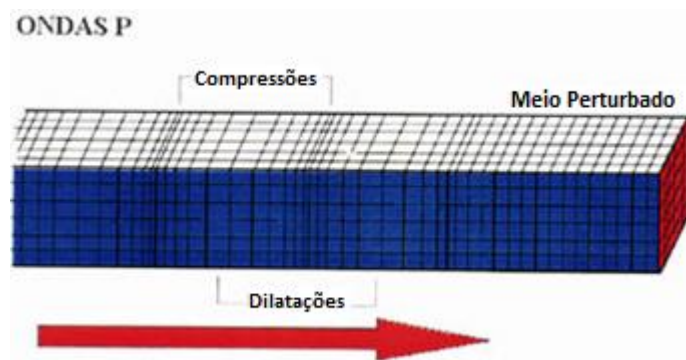


Figura 1 – Ondas P
Fonte: (Rafael, 2009)

As ondas S, ou secundárias são ondas transversais ou de cisalhamento. O movimento que se verifica num modelo é um deslocamento deste perpendicularmente à direção de propagação das ondas. Chamam-se secundárias por serem mais lentas que as P. Apenas se propagam em meios sólidos porque gases e líquidos não sofrem deformações de corte. Estão intrinsecamente ligadas ao Módulo de Rigidez conferindo-lhes importância em engenharia civil e em geotecnia na caracterização de solos.

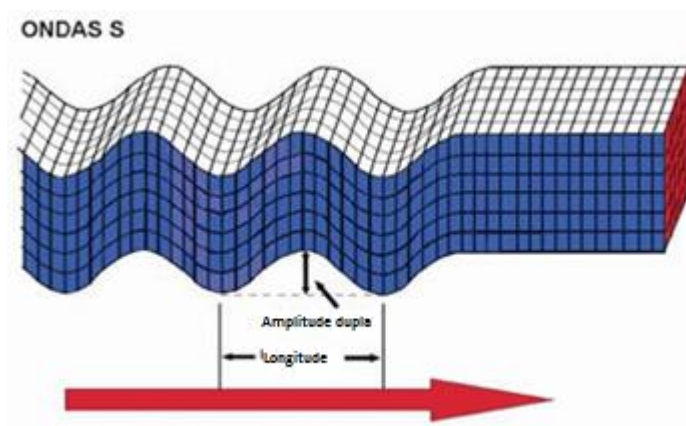


Figura 2 – Ondas S
Fonte: (Rafael, 2009)

É possível relacionar a velocidade das ondas P com a velocidade das S através do coeficiente de Poisson e peso volúmico. Em muitos meios a velocidade das ondas P é um pouco inferior ao dobro da velocidade das ondas S.

2.1.2. Eletrorresistividade

O método de eletrorresistividade baseia-se no estudo do potencial elétrico. Esse potencial pode ser de campos elétricos naturais ou artificiais. Neste trabalho os potenciais são gerados artificialmente. O objetivo é reconhecer corpos ou estruturas geológicas ou, no caso deste

trabalho, variações nas propriedades condutoras do solo em função do grau de saturação ao longo do tempo.

2.1.2.1. Resistência e Resistividade

Neste trabalho utilizam-se ambas resistências e resistividades. Fazem-se medições de resistência e os valores são transformados em resistividades.

A resistência elétrica dum material é uma medição da dificuldade que uma corrente elétrica tem a passar no material mesmo quando se aplica uma diferença de potencial. O inverso da resistência elétrica é a condutividade elétrica que mede a facilidade com que a corrente passa. É possível fazer um paralelismo entre os conceitos de resistência elétrica e a fricção mecânica. A unidade SI para a resistência elétrica é o ohm (Ω).

Num condutor metálico, quando existe uma diferença de potencial, existem inúmeros elétrons livres que se movimento no sentido de menor carga. Esses elétrons colidem entre si e com os átomos do material. A dificuldade desse movimento é bastante condicionada pela estrutura molecular do material, no caso dos minerais, da estrutura cristalina. No solo, a condução é feita através de iões livres. A resistência dum dado material também varia com a temperatura e a com a geometria do mesmo. Quanto maior o comprimento, maior a resistência. Quanto mais fino um condutor, maior a resistência.

Para materiais uniformes e isotrópicos com secções transversais uniformes utiliza-se a segunda lei de Ohm:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad 1$$

Em que R é a resistência elétrica do material, ρ é a resistividade elétrica, l é o comprimento e A é a área de secção do condutor.

Medições de resistência elétrica dependem da geometria escolhida para o fazer, ou seja, não é uma característica intrínseca do material. Para contrariar esse problema utilizam-se resistividades elétricas que é uma característica do próprio material que quantifica o quanto o material se opõe ao fluxo da corrente.

A resistividade elétrica representa-se pela letra p e as unidades SI são o Ohm metro ($\Omega.m$).

Na Tabela 1 apresentam-se alguns valores conhecidos de resistividade e condutividade para alguns materiais relevantes.

Tabela 1 - Resistividade e condutividade de alguns minerais e rochas (Aktarakçi, 2008) e (Telford, Geldart, & Sheriff, 1990)

Rocha	Resistividade (Ωm)	Condutividade (mS/m)
Granito (húmido e seco)	$4,5 \times 10^3 - 1,3 \times 10^6$	0,0008 – 0.22
Gabro	$10^3 - 10^6$	0,001 - 1
Xisto	$20 - 10^4$	0,1 - 50
Mármore	$100 - 2,5 \times 10^8$	0,000004 - 10
Quartzito	$10 - 2 \times 10^8$	0,000005 - 100
Argilito	10 - 800	1,25 - 100
Calcário	$50 - 10^7$	0,0000001 - 20
Argila (húmida e seca)	1 - 100	10 - 1000
Areia (húmida e seca)	$1 - 10^4$	0,1 - 1000
Água doce (20° C)	80	12,5
Água subterrânea	0,5 - 300	3,3 - 2000
Água salgada	0,1 - 1	1000 - 10000
Água do mar	0,2	5000
Ferro	9×10^{-8}	1.1×10^4
Cobre	2×10^{-8}	5×10^4
Solo	1 - 10	100 - 1000

2.1.2.1. Lei de Archie

A lei de Archie, formulada originalmente em 1942, (Archie, 1942), em petrofísica, relaciona a condutividade elétrica in-situ duma rocha sedimentar com a sua porosidade e saturação salina. Ao longo do tempo a teoria original foi sendo adaptada e atualizada e hoje existem variadas abordagens. Relevantes a este trabalho serão:

$$\sigma_f = \frac{1}{a} \sigma_w \phi^m S^n \quad 2$$

Em que ϕ – porosidade, σ_f – condutividade elétrica da rocha saturada, σ_w representa a condutividade elétrica do eletrólito intergranular, S – é a saturação do eletrólito, m – o expoente de cimentação (geralmente 1.8-2.0 em arenitos), n – expoente de saturação (geralmente próximo de 2), a – fator de tortuosidade.

Se a equação for reformulada para resistividade elétrica em vez de condutividade obtém-se:

$$\rho_f = a\phi^{-m}S^{-n}\rho_w \quad 3$$

Onde ρ_f é referente à resistividade da rocha saturada e ρ_w para a resistividade do eletrólito.

O fator:

$$F = \frac{a}{\phi^m} = \frac{\rho_o}{\rho_w} \quad 4$$

É também chamado de fator de formação, onde ρ_o é a resistividade da rocha preenchida apenas com água ($S=1$).

O fator:

$$I = \frac{\rho_t}{\rho_o} = S^{-n} \quad 5$$

É também chamado de índice de resistividade.

A Lei de Archie é uma lei puramente empírica que tenta descrever o fluxo de iões (maioritariamente sódio de cloro) em areias limpas e consolidadas com porosidade intergranular variante. A condutividade elétrica assume-se que não está presente dentro dos grãos ou noutros fluidos além da água.

Quando o solo apresenta uma quantidade apreciável de argilas constituindo uma matriz argilosa as expressões entram em linha de conta com esse aspeto (Glover P. , 2014):

$$\frac{1}{\rho_t} = \frac{(1 - V_{arg})}{\rho_{areia}} + \frac{V_{arg}}{\rho_{arg}} \quad 6$$

Onde ρ_t – resistividade total; ρ_{areia} – é a resistividade da rocha limpa no reservatório; ρ_{arg} – resistividade da argila e V_{arg} – fração de argila. e

$$\rho_{areia} = F_{areia}R_wS_w^{-n} \quad 7$$

A fórmula pode ser rescrita para incluir o grau de saturação.

$$\frac{1}{\rho_t} = \frac{(1 - V_{arg})S_w^n}{F_{areia}\rho_w} + \frac{V_{arg}}{\rho_{arg}} \quad 8$$

2.2. Parâmetros e conceitos mecânicos

2.2.1. Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson (ν) é definido pela relação entre deformação lateral e longitudinal num corpo sujeito a uma força axial de tração ou compressão.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{lat}}{\varepsilon_{long}} \quad 9$$

Com: ε_{lat} – Deformação lateral; ε_{long} – Deformação longitudinal.

2.2.2. Módulo de Rigidez

O Módulo de Rigidez (G) de um material, também conhecido por Módulo de Cisalhamento ou Módulo de Torção, é definido como a razão entre a tensão de cisalhamento aplicada ao corpo e a sua deformação específica.

$$G = \frac{F}{A} / \frac{\Delta x}{h} \quad 10$$

Com: F/A - Tensão de cisalhamento; $\Delta x/h$ - Deformação angular.

2.2.3. Módulo de Young

O módulo de Young (E) é também conhecido como Módulo de Elasticidade. É um parâmetro mecânico que relaciona uma tensão aplicada num dado material e a deformação que esse material sofre aquando a aplicação dessa tensão. O módulo de Young, é dado por:

$$E = \frac{T}{\varepsilon} \quad 11$$

Com: T - Tensão aplicada; ε - Deformação elástica longitudinal.

2.2.4. Módulo Volumétrico

O Módulo Volumétrico (K), descreve a elasticidade volumétrica de um material. Por outras palavras, a facilidade com que esse material se deforma em todas as direções quando sofre uma pressão hidrostática (igual em todas as direções). O módulo é obtido através da razão entre tensão e deformação volumétrica.

$$K = -V \frac{\partial P}{\partial V} \quad 12$$

Com P - Pressão; V - Volume; $\frac{\partial P}{\partial V}$ - derivada parcial da pressão em relação ao volume.

Este módulo é o inverso da compressibilidade.

2.2.5. Teoria das pequenas deformações

A propagação de ondas sísmicas nada mais é do que a propagação de deformações. As ondas S são a propagação das deformações transversais gerando tensões de cisalhamento, intrinsicamente ligadas ao Módulo de Rigidez como demonstrado na Equação 10. No entanto, na prospeção geofísica as ondas sísmicas não criam grandes deformações e, sendo G uma razão entre tensão e deformação, quando se trata de G para a propagação de ondas está a referir a G para pequenas deformações, denominado G_0 . Assim, neste trabalho, não se trata de valores de G (Figura 3) que dependem da tensão de cisalhamento, mas sim de G_0 para pequenas deformações.

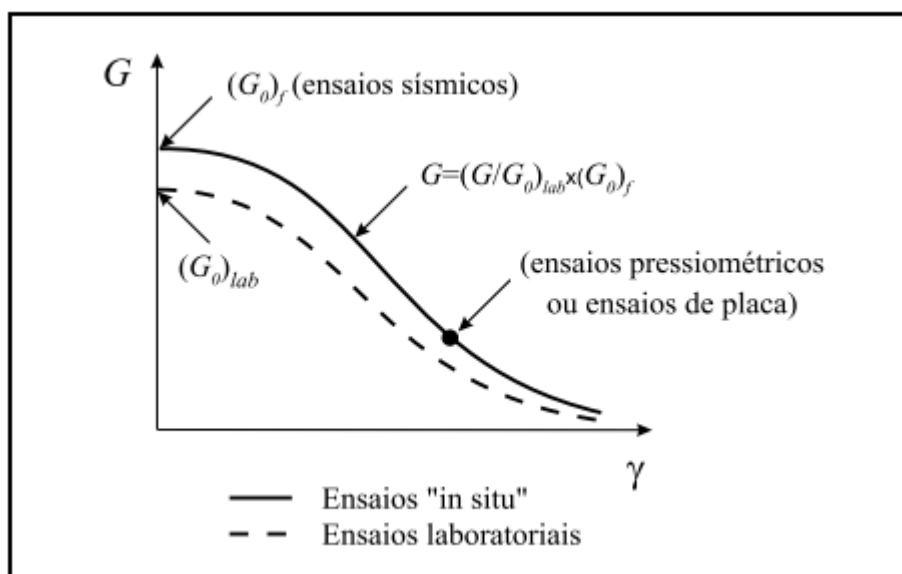


Figura 3 - Curva de Degradação de G .
Adaptado de: (J. A. Santos, 2000)

2.2.6. Grau de Saturação, S e Teor em água, w

Neste trabalho invoca-se muitas vezes o termo grau de saturação do solo e teor em água. É necessário então compreender do que se tratam. Formulações retiradas de (Fernandes, 2012).

O grau de saturação representa-se pela seguinte razão:

$$S = \frac{V_w}{V_a + V_w} = \frac{V_w}{V_v} (\%) \quad 13$$

Em que V_a é o volume de ar, V_w é o volume de água e V_v é o volume de vazios ($V_w + V_a$).

Solos compressíveis submetidos a um aumento de sucção podem sofrer redução da quantidade de água armazenada nos poros devido à redução do volume de vazios e à compressão da massa de sólido devido aos mesmo efeito de sucção. Nota-se então que embora o volume de água

diminua o grau de saturação pode-se manter igual. Outro modo de discutir a presença de água no solo é falar em teor em água que é dado simplesmente por:

$$w = \frac{P_w}{P_s} * 100 \text{ (\%)} \quad 14$$

Em que P_w é o peso da massa de água e P_s é o peso da massa de solo seco. Utilizando esta variável descreve-se a quantidade de água absoluta no solo e não o espaço que ela ocupa.

O grau de saturação é medido em termos de volume enquanto o teor em água é medido em termos de peso.

2.2.7. Estados do solo quanto ao teor em água

Neste subcapítulo esclarece-se as várias nomenclaturas que designam um solo dependendo do seu teor em água, que são utilizadas ao longo deste documento. Estas denominações são dependentes do grau de saturação do solo. As denominações são retiradas de (Fernandes, 2012).

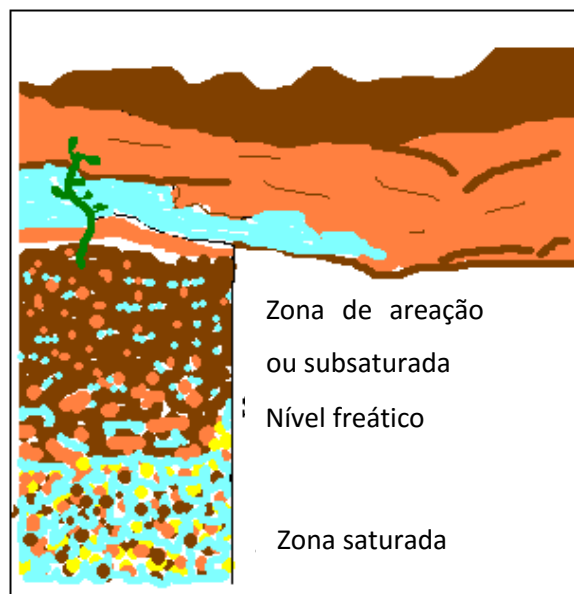


Figura 4 - Modelo dos vários estados de solo quanto ao grau de saturação. Adaptado de (Rakotomalala, 2005)

A Figura 4 representa o comportamento da água num solo arenoso. Na zona subsaturada verifica-se a retenção parcial da água, enquanto que na saturada a água preenche todos os espaços vazios entre os grãos que formam o solo.

2.2.7.1. Solo seco

Diz-se que um solo está seco quando o seu grau de saturação é nulo ($S=0$). Isto significa que o solo não possui qualquer humidade nos seus poros.



Figura 5 - Solo seco

2.2.7.2. Solo subsaturado

Diz-se que um solo se encontra subsaturado quando existe alguma retenção da água, mas ainda existe ar no solo, ou seja, o grau de saturação varia entre 0 e 100% ($0 < S < 100$). Neste trabalho trabalha-se sempre com solo subsaturado pois no início dos ensaios este não se encontra totalmente seco nem nunca se atinge saturação completa.

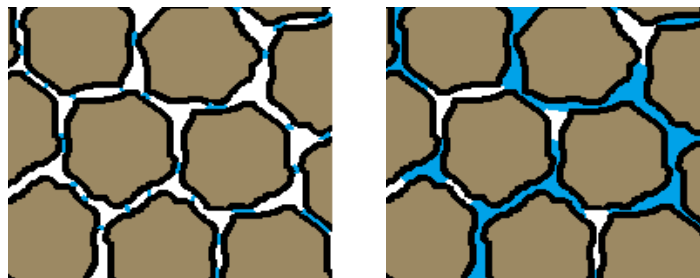


Figura 6 - Solos subsaturados

2.2.7.3. Solo saturado

Diz-se que um solo está saturado quando todos os poros são preenchidos por água, ou seja, o volume de água é igual ao volume de vazios e o Grau de saturação do solo é 100% ($S=100\%$). Neste trabalho este estado nunca é atingido.

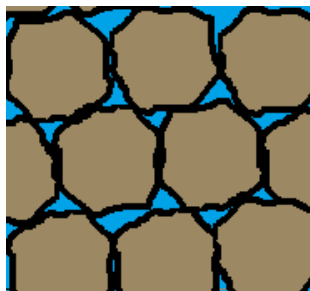


Figura 7 - Solo saturado

2.2.7.4. Solo submerso

Um solo submerso é o solo que se encontra a cotas inferiores ao nível freático. Existe uma pressão criada pela água nos espaços intergranulares que contraria a gravidade. É uma pressão neutra expulsiva. A superfície que limita superiormente este solo, onde a pressão da água é igual à pressão atmosférica, chama-se nível freático.

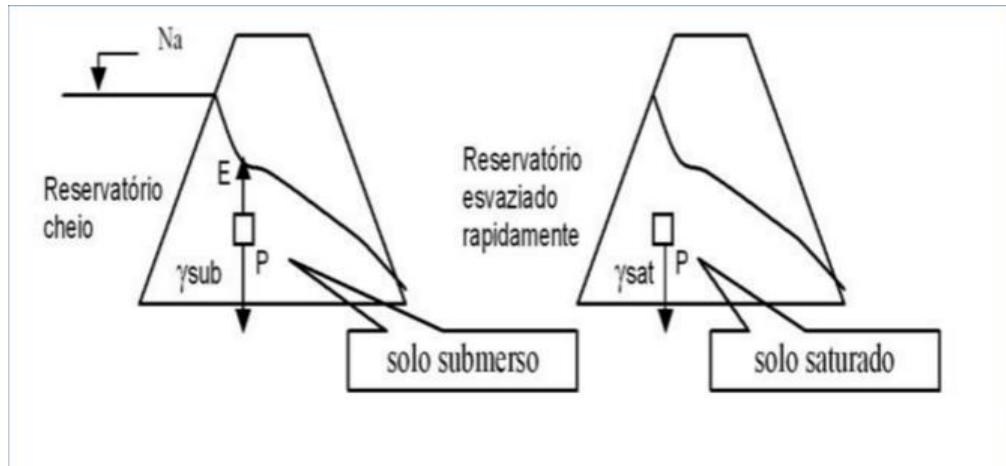


Figura 8 - Comparação dum solo submerso com um saturado e exemplificação da força de "empuxo".
Retirado de (Fosco, s.d.)

2.2.8. Tensão capilar atuante no solo

Neste trabalho é necessário entender o conceito de tensão capilar devido à ação da água no solo enquanto este não está saturado pois essa ação, teoricamente fará variar os valores de velocidade e resistividade medidos pois a tensão capilar no solo, novamente, não saturado, atrai as partículas umas às outras devido à formação duma membrana contrátil por causa da tensão superficial da água e a da superfície das partículas. As forças responsáveis pelo efeito contrátil são as forças de Van der Waals.

Quando existe pressão capilar as partículas são puxadas umas contra as outras o que gera um aumento das tensões efetivas no contacto entre estas. Tecnicamente a capilaridade não gera coesão aparente, como muita literatura o sugere, mas este fenómeno, reflete-se mais no atrito. Outros aspetos químico-mineralógicos também têm o seu papel, mas não são o mais importante.

“Num líquido, uma molécula que se encontre à superfície sofre uma atração mais intensa no sentido do interior, onde existe maior número de moléculas. Como consequência, a superfície do líquido comporta-se como se fosse uma membrana elástica tensa em todas as direções pela chamada tensão superficial. Esta, por não depender da direção, é uma grandeza escalar e tem as dimensões de uma força por unidade de comprimento. (...) Uma das consequências da tensão

superficial é a capilaridade. Nos líquidos como a água a capilaridade manifesta-se pela subida em tubos de muito pequeno diâmetro – tubos capilares – formando a parte superior do líquido um menisco côncavo.”

Texto retirado de (Fernandes, 2012)

Segundo (Fernandes, 2012), nos solos os fenómenos de capilaridade não são tão simples como em tubos. Os grãos minerais que compõem um solo têm formas e dimensões muito variáveis que, formam espaços irregulares entre eles, ou seja, a altura da ascensão capilar varia de ponto para ponto no solo. Ascensões menores acontecem em poros mais largos e ascensões maiores em poros de menores dimensões.

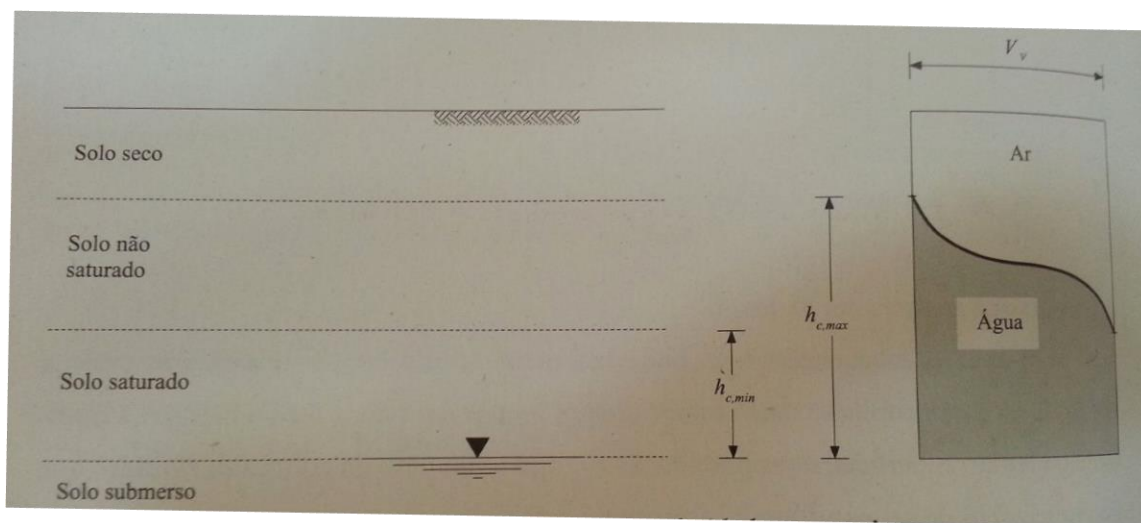


Figura 9 - Esquema simplificado do efeito da capilaridade nos maciços terrosos. Adaptado de (Fernandes, 2012)

A Figura 9 representa um solo com passagem da zona seca para a zona saturada do mesmo. Com a subida do nível freático, o solo previamente seco passa estar abrangido na zona capilar a cima da zona saturada. Este trabalho procura estudar o comportamento do solo nessa situação.

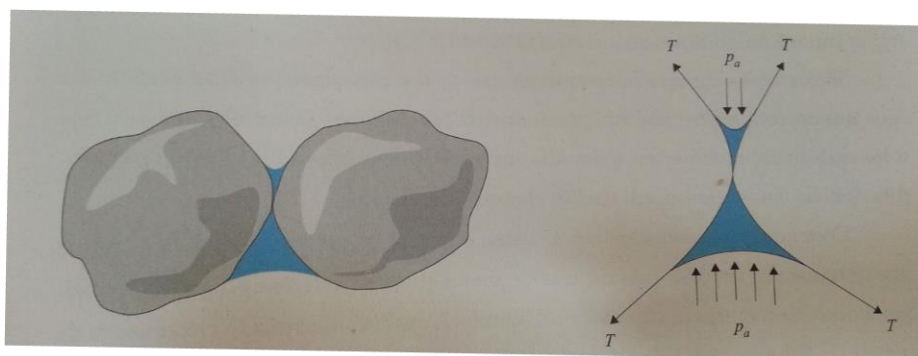


Figura 10 - Água retida por capilaridade entre duas partículas. Retirado de (Fernandes, 2012)

Ainda o mesmo autor apresenta uma tabela com valores da altura esperada da ascensão da água por capilaridade em solos de diferentes granulometrias.

Tabela 2 - Ordem de grandeza da altura de ascensão capilar nos solos. Adaptado de (Fernandes, 2012)

Tipo de solo	h_c (cm)
Cascalhos	Praticamente nula
Areias	10 a 100
Siltes	100 a 1000
Argilas	> 1000

h_c é a altura capilar nos diferentes tipos de solos.

Verifica-se que, quanto mais pequenos os grãos ou mais fina a granulometria, mais pequenos os poros e a ascensão capilar torna-se mais importante.

Conclui-se que o estudo da quantidade de finos num solo é importante para a interpretação da capilaridade no mesmo.

2.2.9. Potencial capilar

Todas as substâncias têm força de atração de curto alcance e de baixa intensidade chamadas de forças de Van der Waals, as moléculas de água não são exceção à regra - $< 5 \times 10^{-6}$ cm e na ordem dos 2 kcal/mol (Machado & Vilar, 2015).

Se essas forças forem desenvolvidas entre as moléculas dum mesmo fluido chamam-se forças de coesão, no entanto, se forem entre as moléculas do fluido e duma superfície sólida, chamam-se forças de adesão. Portanto a capilaridade da água nos solos e, como consequência, o potencial capilar surgem vindos dessas forças.

A Figura 11 ilustra as forças que atuam sobre duas moléculas de água, uma à superfície da água numa interface ar/água e a outra a uma profundidade superior a maior que 5×10^{-6} cm (raio de ação das forças Van der Waals).

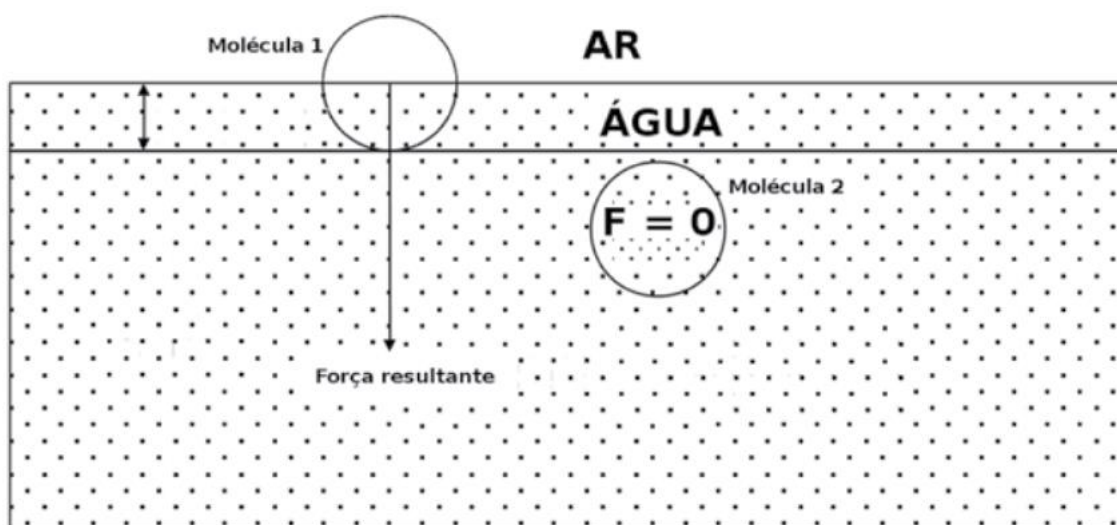


Figura 11 - Ilustração da atuação das forças coesivas (adaptado de (Libardi, 1993))

As forças de coesão entre moléculas de água são muito superiores às forças de atração entre moléculas de ar e água logo, a primeira molécula está sujeita a uma força que a puxa para o interior do corpo de água. Este desequilíbrio nas forças de atração faz que com que, na interface ar/água exista, a superfície do líquido se contraia o que minimiza a sua área específica e adquira uma energia potencial extra que se opõe a distensões. À superfície do líquido pode-se chamar membrana contrátil. Estas membranas formam-se sempre que existem interfaces entre diferentes líquidos ou líquidos e sólidos.

2.2.10. Sucção da água no solo

O efeito da sucção no solo é alvo de estudo neste trabalho, para tal é necessário compreender bem este conceito.

Segundo (Fernandes, 2012) a sucção da água no solo, ou apenas sucção, não é mais do que a água retida no solo acima do nível freático. Esta água encontra-se a uma pressão inferior à pressão atmosférica. A sucção representa a força com que o solo retém a água e varia de um modo contínuo com o teor em água. À medida que solo seca, a água vai ficando retida em capilares cada vez mais finos, os meniscos formados têm cada vez menor raio e a sucção aumenta. A sucção em solos submersos é zero e pode ir até valores nas centenas de MPa em argilas muito ativas secas em estufa.

O mesmo autor nota também que que a capilaridade implica pressões neutras que são negativas o que aumenta a tensão efetiva. Portanto o efeito das pressões capilares é o de ligar as partículas sólidas por forças que se somam às do peso próprio e às de eventuais ações exteriores. Isto

resulta num aumento da resistência do solo principalmente em solos finos com teores em água pequenos.

É deste efeito que resulta o comportamento das areias quando possuem alguma humidade. Quando têm pouca, possuem uma resistência enorme e aparentam ser coesas, no entanto, secas ou aumentando o teor para valores demasiado altos, perdem essa propriedade.

2.2.11. Compactação nos solos

Dum modo simples, compactar um solo significa aumentar a sua densidade diminuindo o seu índice de vazios. Como consequência, passa a haver mais partículas sólidas por unidade de volume.

Segundo (Villar, Guimarães, Rodrigues, Azevedo, & Carvalho, 2015), onde foram compilados décadas de estudos sobre a compactação em solos existe um ensaio dinâmico para a determinação experimental da curva de compactação dum dado solo. Na Figura 12 representa-se a relação entre massa específica aparente seca (ρ_d) e o teor em água do solo (S).

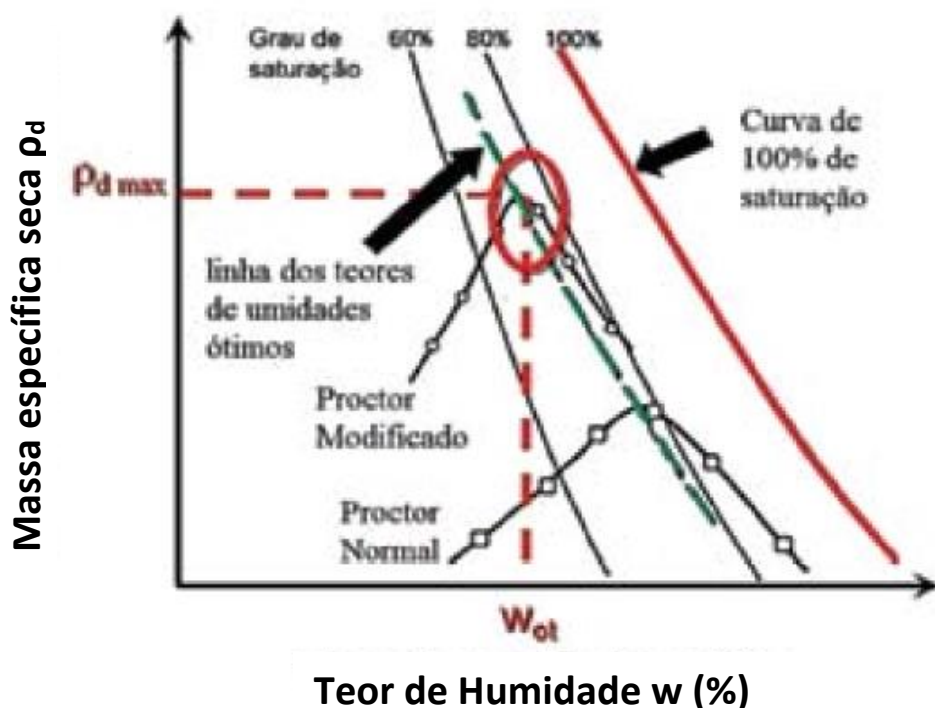


Figura 12 - Curva de compactação destacando a densidade seca máxima, o teor em água e a curva de 100% de saturação. Adaptado de (Villar, Guimarães, Rodrigues, Azevedo, & Carvalho, 2015)

Como se pode verificar, a massa específica aparente varia com o teor em água o que significa que a eficiência ou facilidade de compactação dum dado solo também depende desse fator. Segundo (Proctor, 1933), para o ramo ascendente da curva, o ramo seco, à medida que o teor em água

aumenta, a água lubrifica as partículas do solo o que reduz o atrito intergranular. Quando o teor em água atinge valores que impeçam a expulsão de mais ar intergranular as cargas aplicadas não afetam mais o arranjo das partículas e o solo não compacta mais e o peso específico não aumenta. No ramo descendente da curva temos valores de teor em água que impedem a expulsão do ar e começa a haver mais água do que solo o que leva o peso específico a diminuir. O ponto de inflexão da curva chama-se teor em água ótimo (W_{ot}) e corresponde a uma massa específica máxima (γ_{max}). A curva mais à direita representa o comportamento dum solo totalmente saturado (não existe ar nos poros).

(Hogentogler, 1937) determinou também que a compactação depende do teor em água e identificou quatro fases diferentes com o aumento desse teor: hidratação, lubrificação, expansão e saturação do solo.

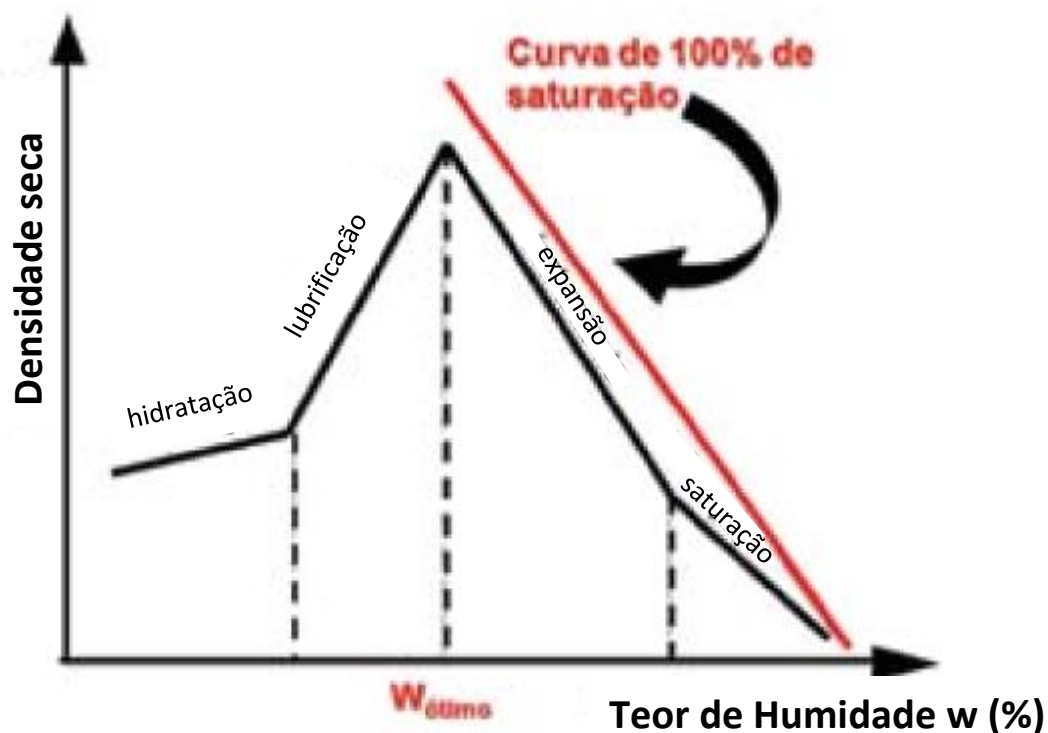


Figura 13 - Teoria de Hogentogler (1937) para explicar a forma da curva de compactação. Adaptado de (Villar, Guimarães, Rodrigues, Azevedo, & Carvalho, 2015)

Essas fases estão representadas na Figura 13. Cada uma das linhas retas na figura representa uma das fases mencionadas anteriormente.

Na primeira fase, a de hidratação, a água é adsorvida pelas partículas onde se forma uma pequena película. Essa adsorção resulta numa diminuição da viscosidade da água que promove

um melhor arranjo dos grãos pois o atrito entre estes diminui. Por consequência, o peso específico do solo aumenta.

Com o aumento do teor em água a camada de água que se forma não só reduz o atrito entre grãos como atua como lubrificante. Entra-se na segunda fase, lubrificação. Para estes teores, é ainda mais facilitado o arranjo das partículas numa dada compactação. O solo torna-se ainda mais denso, mas ainda não está saturado.

Na fase de expansão, a terceira, o teor em água ultrapassa o teor ótimo, causando um aumento de volume no solo (diminuição do peso específico) sem reduzir o volume de ar.

Na última fase, a propagação fase de saturação, todo o ar é expelido do solo e a presença da água não permite novos arranjos e por consequência, aumentos de densidade.

2.2.12. Ensaio Proctor normal e Proctor modificado

Segundo (Santos, 2008) estes ensaios surgiram da necessidade de se estudar os comportamentos de compactação em obras. No ensaio coloca-se uma amostra de solo num molde que depois se compacta. Determina-se o teor em água e o peso volúmico seco. Para diferentes grãos de saturação faz-se o mesmo ensaio e obtém-se a curva de compactação do solo. Segue-se a norma LNEC E197-1966. Existem 4 ensaios diferentes: compactação leve (Proctor normal) em molde pequeno ou molde grande e compactação pesada (Proctor modificado) em molde pequeno ou grande. A compactação ser leve ou pesada define-se dependendo da energia de compactação que é aplicada através dum número de pancadas da queda dum pilão de um dado peso numa altura específica sobre o solo.

Tabela 3 - Ensaio Proctor (E197-1966 LNEC)

Tipos de compactação					
		Leve (Proctor normal)		Pesada (Proctor Modificado)	
Molde	Diâmetro (mm)	102	152	102	152
	Altura (mm)	117	114	117	114
Pilão (kg)		2,49	2,49	4,54	4,54
Altura de queda (cm)		30,5	30,5	47,5	47,5
Número de camadas		3	3	5	5
Número de pancadas por camada		25	55	25	55

2.2.13. Ensaio edométrico

Para estudar as características de compressibilidade unidimensional dum solo em laboratório recorre-se ao ensaio edométrico que é levado a cabo num edómetro.

O edómetro consiste num anel rígido de aço em que no interior se coloca um provete de solo. Nas partes inferior e superior colocam-se pedras porosas que permitem a drenagem da água contida no solo. Existe também uma célula que introduz água para manter as condições de saturação em todos os instantes. Sobre a pedra porosa superior coloca-se uma placa dura e aplica-se uma carga vertical. Esta carga vai aumentando em intervalos. Normalmente vai-se duplicando a carga e mede-se o assentamento no provete em cada um desses intervalos.

A rigidez do anel que contém a amostra impede deformações laterais e impõe condições de compressão unidimensional. Isto faz com que num solo pouco permeável, quando se coloca novamente carga, todo o incremento de tensão vertical total se transmita instantaneamente para a água intersticial e que as tensões efetivas não variem. Posteriormente, à medida que o excesso de pressão nos poros se vai dissipando ao produzir drenagem através do material poroso, as tensões efetivas aumentam e o solo comprime (consolida). Num ensaio edométrico cada escalão de carga há de se manter o tempo suficiente para assegurar que o processo de consolidação se completa, geralmente intervalos de 24 horas. Quando se remove o peso, observa-se o aumento de volume que o solo recupera.

Texto traduzido e adaptado de (Vallejo, 2004).

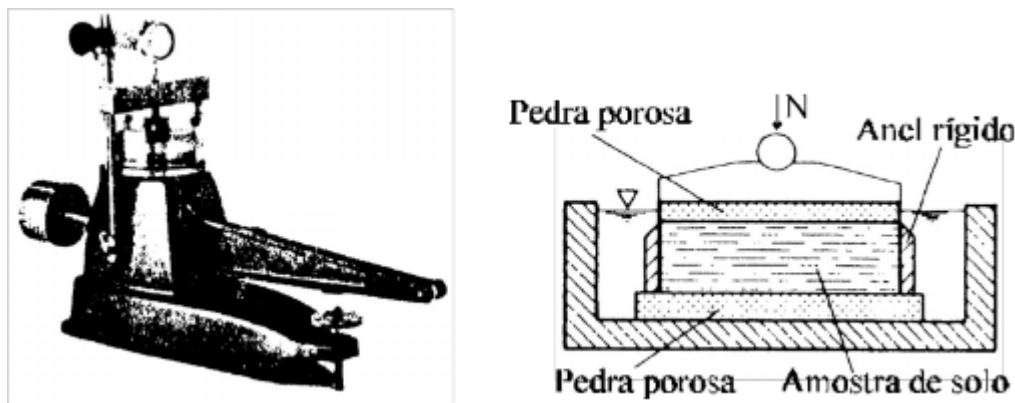


Figura 14 - Aparelho edométrico. À esquerda - vista exterior; à direita corte da célula edométrica. Retirado de (Sequinel, 2016)

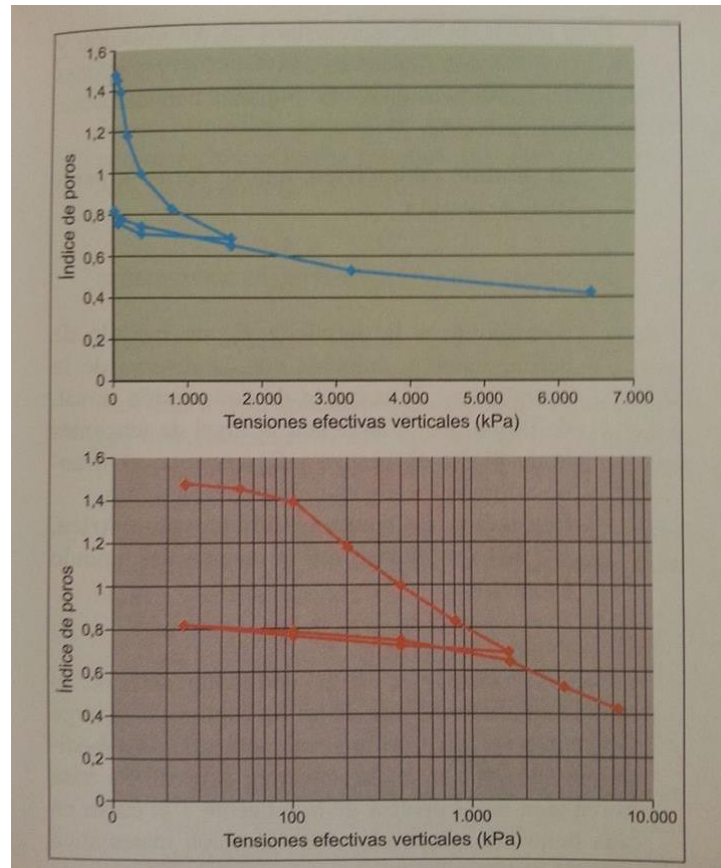


Figura 15 - Representação dum ensaio edométrico. Retirado de (Vallejo, 2004)

2.2.14. Solos colapsáveis e expansivos

Segundo (Vilar & Ferreira, 2015) um solo não saturado, que sofra tensões não variantes tende a sofrer variações de volume apenas com a variação do teor em água. Com o aumento do teor em água, em solos de baixa densidade, normalmente esse solo vai sofrer uma redução de volume. Em solos expansivos, o contrário acontece.

A explicação para esta ocorrência é diferente nos dois casos. Nos solos de baixa densidade, a água funciona como lubrificante que reduz a resistência nos contactos entre as partículas e então existe um rearranjo estrutural devido também à sucção e cria-se uma nova condição de equilíbrio. A este fenómeno chama-se colapso, daí os solos chamaram-se colapsáveis. O termo em português tem um alcance grande em termos de significado e aplicação, no entanto, em geotecnia é utilizado quando se refere ao processo de perda de volume devido ao aumento do teor em água no solo. Um solo verdadeiramente colapsável é aquele que sofre redução do volume apenas devido ao seu próprio peso ao paço que num solo em que tal acontece devido a uma sobrecarga adicional chamam-se de condicionalmente colapsáveis.

A explicação para os fenómenos de expansão é diferente. Normalmente este fenómeno dá-se devido à presença de minerais de carácter expansivo, como as esmectites. Ao contrário dos solos colapsáveis, as causas deste fenómeno, são físico-químicas e para além de apenas existir uma variação de volume, neste caso um aumento, existem também tensão de expansão. O aumento de volume pode ocorrer devido ao aumento do teor em água no solo, pode posteriormente ser reduzido devido a secagem. Isto implica que existem grandes variações de volume sazonalmente. Estes solos contêm minerais de argilas de estrutura laminar do tipo 2:1, como por exemplo montmorilonite ou vermiculite. Estes minerais são caracterizados por possuírem unidades espaçadas entre si onde iões e moléculas de água se podem acumular. Com a hidratação estes minerais expandem e com a desidratação têm o comportamento inverso.

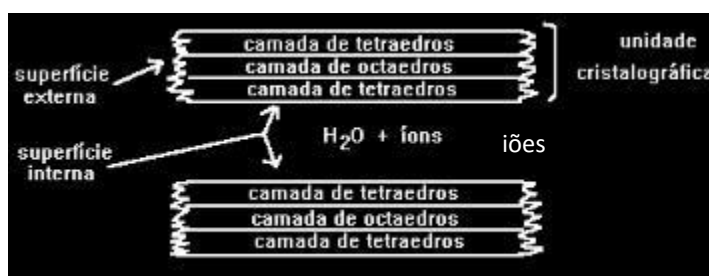


Figura 16 - Representação esquemática das argilas do grupo da montmorilonite (tipo 2:1) - Retirado de (Alvarez, s.d.)

Tabela 4 – Principais características de solos expansivos e colapsáveis. Adaptado de (Vilar & Ferreira, 2015)

Solos Expansivos	Solos Colapsáveis
Solos não saturados;	Solos não saturados;
Solos com minerais de argila, montmorilonite ou vermiculite;	Solos com estrutura porosa ou instável, com partículas interligadas por argila, óxido de ferro, alumínio ou carbonatos.
Contrações e expansões com aparecimento de superfícies de fricção;	Solos de origem recente e de fácil drenagem de regiões tropicais húmidas, com lixiviação dos horizontes superficiais.
Solos com drenagem de baixa e alta atividade derivados de rochas ígneas, como basalto, diabásios e gabros e de rochas sedimentares como xistos argilosos, margas e calcários;	Solos em regiões onde a evapotranspiração excede a precipitação, regiões de alternância de estações secas e chuvas intensas e concentradas.
Solos em regiões onde a evapotranspiração excede a precipitação como regiões semiáridas de clima tropical ou temperado.	

A Tabela 4 expõe algumas das características de ambos os tipos de solo.

Deve ser esclarecido que dependendo da carga atuante, certos solos com baixa densidade e com minerais expansivos podem sofrer colapso ou expansão.

2.3. Relação das ondas sísmicas com os parâmetros geotécnicos

Sendo a velocidade das ondas sísmicas dependentes das propriedades físicas do meio e, os parâmetros geotécnicos serem derivados dos mesmos, é possível relacionar uns com os outros.

A relação entre velocidades e parâmetros elásticos estabelece-se a partir da dedução das equações de onda para as ondas P e S. Primeiro definem-se tensões e deformações aplicadas a um elemento de volume $\partial x, \partial y, \partial z$. Em seguida estabelecem-se as equações de movimento, partindo da segunda Lei de Newton, nos três eixos. Nestas equações as forças aplicadas no volume relacionam-se com as tensões que, por sua vez, são substituídas por deformações através das Leis de Hooke simplificadas para meio isotrópico e homogêneo. (William Murray Telford, 1990)

Para obter a equação de onda para as ondas P aplica-se o divergente às três equações do movimento e determina-se a velocidade em função dos parâmetros de Lamé.

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad 15$$

Com: λ – Primeiro parâmetro de Lamé;

Para obter a equação de onda para as ondas S aplica-se o rotacional às três equações do movimento e a velocidade é dado por:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad 16$$

2.3.1. Coeficiente de Poisson

Partindo das Equações 15 e 16 e das múltiplas relações entre os parâmetros elásticos, obtém-se o Coeficiente de Poisson:

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad 17$$

É possível obter outras expressões que relacionem o Coeficiente de Poisson com outros parâmetros (Dvorkin, 2010).

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{K}{G} - \frac{2}{3}\right)}{\frac{K}{G} + \frac{1}{3}} = \frac{1}{2} \frac{\frac{\lambda}{G}}{\frac{\lambda}{G} + 1} \quad 18$$

Na Figura 17 (Fernando Almeida, 1999) estão ilustrados valores numéricos de Coeficiente de Poisson projetados em ordenadas, a razão entre velocidades das ondas Rayleigh (VR) e S e em abscissas a razão Vs/Vp.

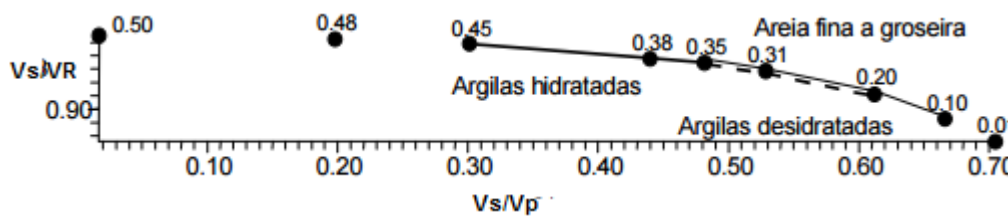


Figura 17 - Diagrama dos coeficientes de Poisson em função de Vs/Vp contra Vs/VR
Adaptado de: (Fernando Almeida, 1999)

2.3.2. Módulo de Rigidez, G

Em solos isotrópicos e homogêneos a velocidade das ondas S é controlada pelo Módulo de Rigidez e pela densidade do solo.

Partindo da Equação 16 colocando G em função de Vs, obtém-se:

$$G = \rho * V_s^2 \quad 19$$

2.3.3. Módulo de Young, E

É possível relacionar o Módulo de Young com os dois parâmetros já discutidos, Coeficiente de Poisson e Módulo de Rigidez. Naturalmente é também possível obter este módulo utilizando a velocidade de propagação das ondas P e S.

$$E = 2G * (1 + \nu) \quad 20$$

Substituindo Equações 15 e 16 na Equação 20, e simplificando obtém-se:

$$E = \frac{\rho * V_s^2 * (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad 21$$

Deste modo é possível obter Módulo de Young diretamente através das velocidades.

2.3.4. Módulo Volumétrico, K

A relação do Módulo Volumétrico com os parâmetros G e ν é:

$$K = 2G * \frac{1 + \nu}{3(1 - 2\nu)} \quad 22$$

Para obter o módulo volumétrico através das velocidades das ondas sísmicas usa-se o mesmo método que para o módulo de Young. Utiliza-se a relação entre K (Equação 22) e G (Equação 19), ν (Equação 17) e simplificando, obtém-se:

$$K = \frac{\rho * Vs^2 * (3Vs^2 - 4Vs^2)}{3Vs^2} \quad 23$$

Deste modo é possível o Módulo Volumétrico diretamente através das velocidades.

3. Estado da arte

Nesta secção aborda-se o estado da arte para suportar o trabalho realizado.

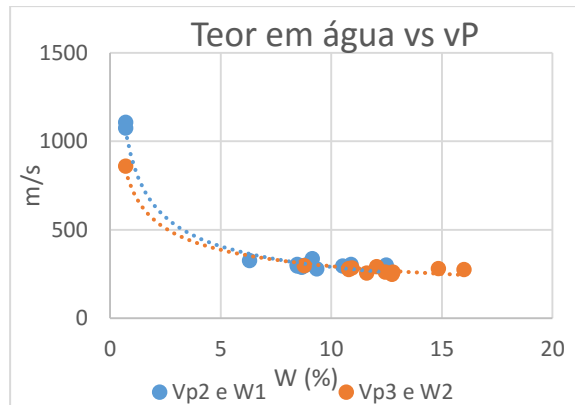


Figura 18 - Teor em água contra velocidade das ondas P. Retirado de (Baieta, 2015)

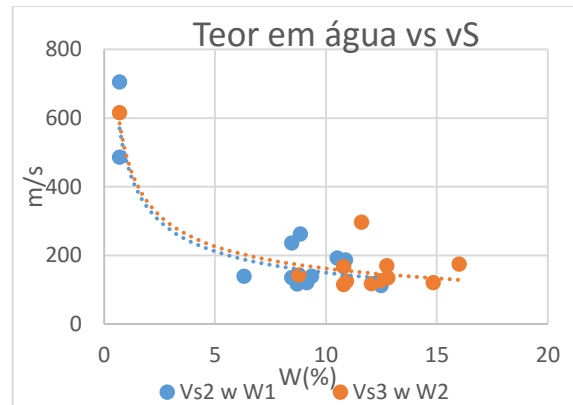


Figura 21 - Teor em água contra velocidade das ondas S - Retirado de (Baieta, 2015)

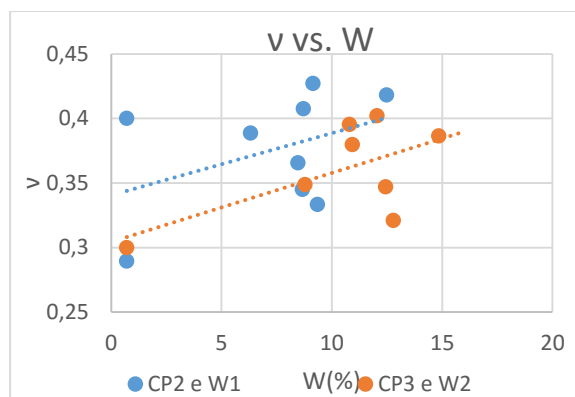


Figura 19 - Teor em água contra o coeficiente de Poisson. Retirado de (Baieta, 2015)

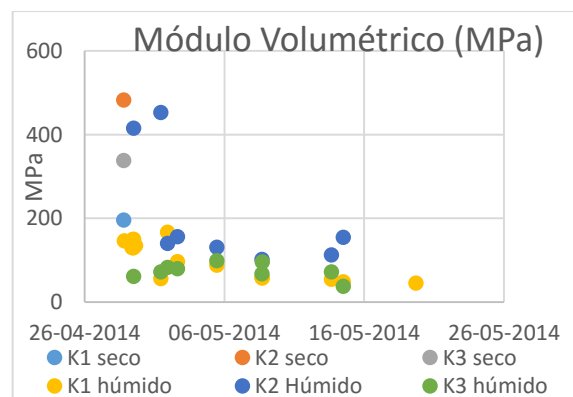


Figura 22 - Módulo Volumétrico no tempo. Retirado de (Baieta, 2015)

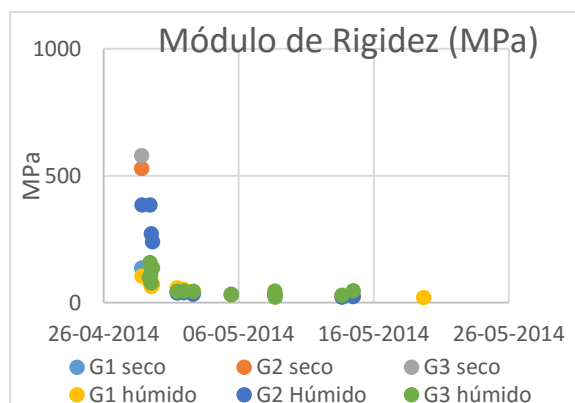


Figura 20 - Módulo de Rigidez no tempo. Retirado de (Baieta, 2015)

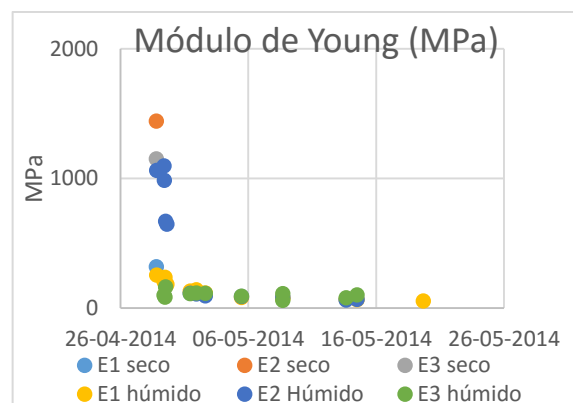


Figura 23 - Módulo de Young no tempo. Retirado de (Baieta, 2015)

Foi realizado um projeto anterior a este trabalho que aborda os mesmos assuntos e uma montagem experimental semelhante (Baieta, 2015). Nesse trabalho estudou-se a variação das velocidades das ondas P e S, coeficiente de Poisson e outros parâmetros geotécnicos (E, K, G) num solo semelhante ao utilizado neste trabalho à medida que se fazia variar o teor em água. Concluiu-se que variar o teor em água, faz as velocidades e os parâmetros geotécnicos todos decrescerem, à exceção do coeficiente de Poisson (Figuras 18-23). É importante referir que neste trabalho passado, o solo inicialmente estava totalmente seco, ao contrário do atual. Deste modo foi possível estudar o efeito de sucção que desta vez não foi. Encontrou-se um teor em água em que o solo apresentava características mecânicas melhores para a propagação de ondas pois observaram-se velocidades maiores.

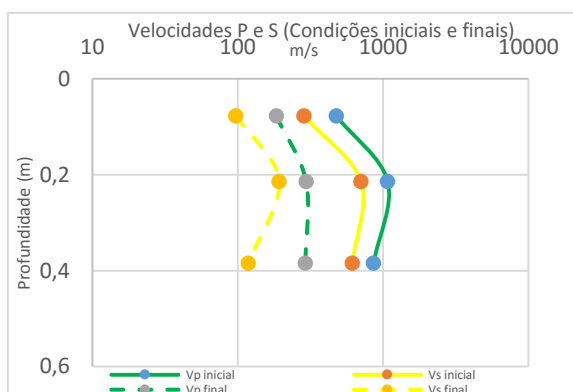


Figura 24 - Velocidades P e S; a cheio em condições de sobreconsolidação por dessecação e a tracejado em condições de sobressaturação. Retirado de (Baieta, 2015)

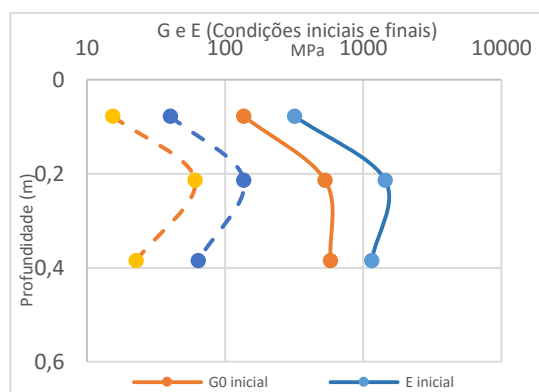


Figura 25 - Parâmetros G e E; a cheio em condições de sobreconsolidação por dessecação e a tracejado em condições de sobressaturação. Retirado de (Baieta, 2015)

Como se verifica nas Figuras 24 e 25, a meio do solo, sendo a zona onde a sucção se encontra, existe um aumento de velocidade.

A rigidez dinâmica do solo tanto pode ser indicada pelo Módulo de Rigidez em Pascal como pode ser obtida a partir da velocidade de onda S em m/s e da densidade. É um parâmetro fundamental para a análise de estruturas em solos como escavações, aterros e fundações para apoiar superestruturas assim como resposta dos terrenos em engenharia sísmica. (Sykora, 1987)

Em J. A. Santos, 2000 foi feita uma compilação de dados de vários autores que relacionam G_0 com o índice de vazios (e) para vários tipos de solos (Figura 26).

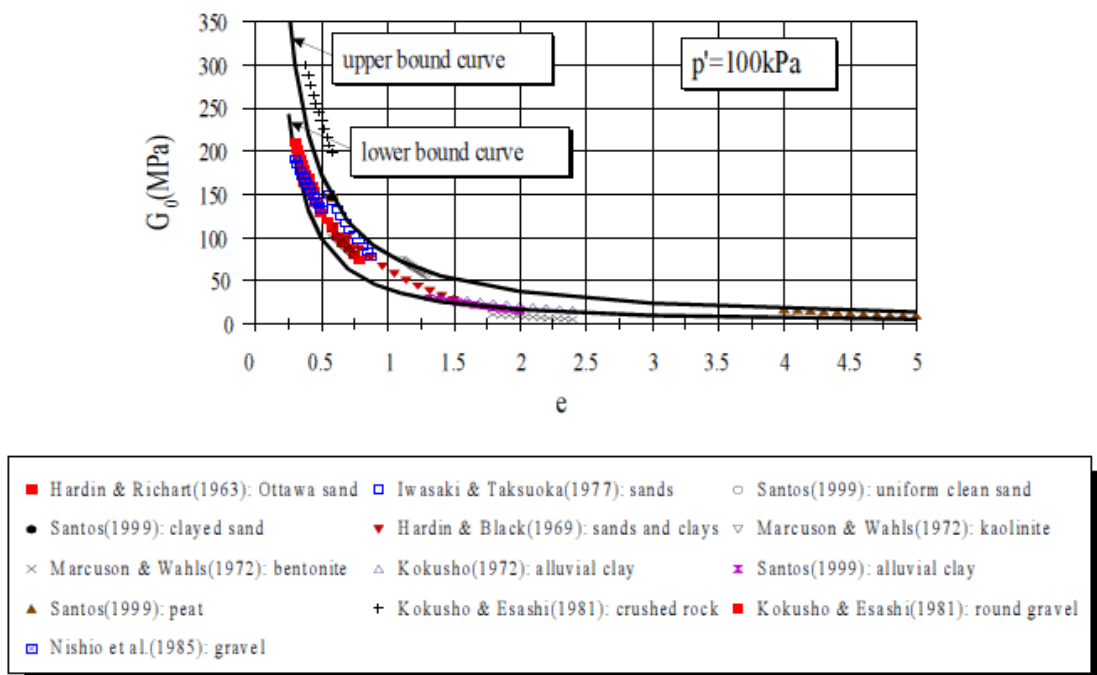


Figura 26 - G_0 como função de e .

A importância da relação entre velocidade das ondas P e S, (V_p/V_s), em projetos de engenharia também já foi fortemente estudada. Esta relação é equiparável ao coeficiente de Poisson.

Segundo (Keçeli, 2012) a determinação das velocidades sísmicas, Módulo de Young e das propriedades estruturais do solo não é o suficiente para projetos de Engenharia. Portanto a carga máxima que um solo resiste tem sido definida expressando a tensão no solo com a velocidade das ondas S. Neste contexto, a relação da densidade também é definida em termos de velocidade das ondas P (V_p) através da seguinte equação:

$$\rho = a * V_p^\alpha \quad 24$$

Com: $a=0.31$; $\alpha=0.25$.

Utilizando a semelhança entre o fator de segurança e V_p/V_s , tem sido demonstrado que esta relação pode ser utilizada juntamente com um fator de segurança e um fator de redução de água.

Segundo (Bastos, 93) num trabalho em que estuda velocidades de ondas compressoriais e cisalhantes como indicadores de litologia e tipo de fluido contido em rochas porosas, como aquela utilizada neste estudo, conclui-se que rochas porosas têm sempre os seus poros cheios de algum fluido e as propriedades desses fluidos vão determinar as propriedades das ondas acústicas que os atravessam. Medidas de velocidades variam bastante em amostras secas ou saturadas. Na Figura 27 apresenta-se um exemplo de velocidades medidas contra a pressão efetiva em granitos para amostras secas, parcialmente saturadas e totalmente saturadas.

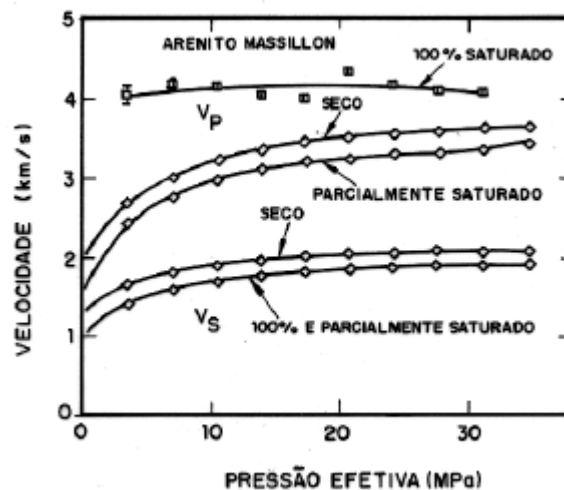


Figura 27 - Velocidade versus pressão para o arenito Massillon seco, parcialmente saturado e totalmente saturado. Retirado de (Bastos, 93)

Da figura retira-se que, para ondas compressivas, a velocidade diminui com o aumento da saturação do material. À medida que se introduz água nos poros da rocha, a sua densidade aumenta, diminuindo a sua velocidade.

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4G}{3}}{\rho}} \quad 25$$

Com: K - Módulo de Volume; G - Módulo de Rigidez;

No caso dos solos arenosos em estudo, julga-se que a incorporação de água dissolve os sais que ligam as partículas argilosas o que baixa o Módulo de Rigidez e aumenta a densidade, reduzindo assim, a velocidade das ondas P.

No Japão, devido a enxurradas intensas, inúmeros diques fluviais encontram-se danificados e/ou em risco de rotura. Para contrariar esse problema, o governo está a investir no estudo dos solos. Tentou-se encontrar uma solução barata para avaliar a vulnerabilidade dos solos para ser aplicada nestas zonas.

Em (Konishi & Hashimoto, 2016) assume-se que areia simples e misturas argilosas representam diferentes tipos de solos de maneira a que o conteúdo em argilas e a porosidade possam ser usados para expressar diferentes tipos de solos e a “looseness” do solo, respetivamente.

Para o modelo de velocidade foi escolhido o modelo de argila constante (Avseth & Mavko, 2005). Nesse modelo o módulo de cisalhamento efetivo é determinado através da porosidade e os módulos de rigidez e volumétrico dos grãos. A velocidade vem do módulo de rigidez efetivo e densidade (Equação 26).

Como os módulos efetivos variam com a quantidade de argilas no solo, as velocidades calculadas refletem diferentes tipos de solo.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad , \quad G = f(\phi, K_s, G_s) \quad 26$$

Com ρ : densidade; G : módulo de rigidez efetivo; K_s , G_s : módulos volumétrico e de rigidez dos grãos; ϕ : porosidade; f : Modelo.

Para o modelo de resistividade foi selecionado um dos modelos de circuito em paralelo (Glover, Hole, & Pous, 2000), entre outros modelos que foram propostos. Este modelo considera dois materiais condutores, fase sólida e água. Visto que a fase sólida é a mistura de areia e argila neste artigo, esse modelo foi modificado para ser aplicado a essa mistura em sedimentos não saturados. Foi assumido que a condutividade da fase sólida é dada pelas equações de (Hashin & Shtrikman, 1962) com conteúdo em argila e a condutividade efetiva é expressa pela Equação 28.

$$\sigma_m = \sigma_{argila} \left[1 - \frac{3(1-C)\delta\sigma}{3\sigma_{argila} - C\sigma} \right] \quad 27$$

$$\delta\sigma = \sigma_{argila} - \sigma_{areia} \quad 28$$

Com σ_{argila} , σ_{areia} : condutividade da areia e da argila, C = conteúdo em argila.

$$\sigma_{eff} = \sigma_m (1 - \phi)^{\frac{\log(1-\phi^m)}{\log(1-\phi)}} + \sigma_w^m S_w^n \quad 29$$

Com σ_m, σ_w : Condutividade da fase sólida e da água; S_w : grau de saturação; n : constante de saturação.

Para a vulnerabilidade, visto que se estava a tratar de infiltrações, zonas de solo solto e permeável podem ser integrados como vulneráveis. A permeabilidade é estimada da porosidade e tamanho dos grãos usando a equação de Kozeny-Carman mas, para obter a permeabilidade absoluta, a calibração da permeabilidade estimada e medida é necessária. Em vez de se obter permeabilidade absoluta, um valor de pseudo-permeabilidade é definido (Equação 30), e usado como quantidade representando a vulnerabilidade. A quantidade representa um valor relativo, mas apesar disso, tem benefícios a detetar zonas vulneráveis eficazmente, então é proposto usar essa quantidade.

$$Vulnerabilidade = a\{(1-C)^2 * \phi\} \quad 30$$

Com C : conteúdo em argilas, ϕ : Porosidade; a : constante.

Usando os modelos para propriedades elétricas e elásticas de solos argiloarenosos foi possível prever a resistividade e a velocidade de ondas S para certos intervalos de porosidade e conteúdo argiloso.

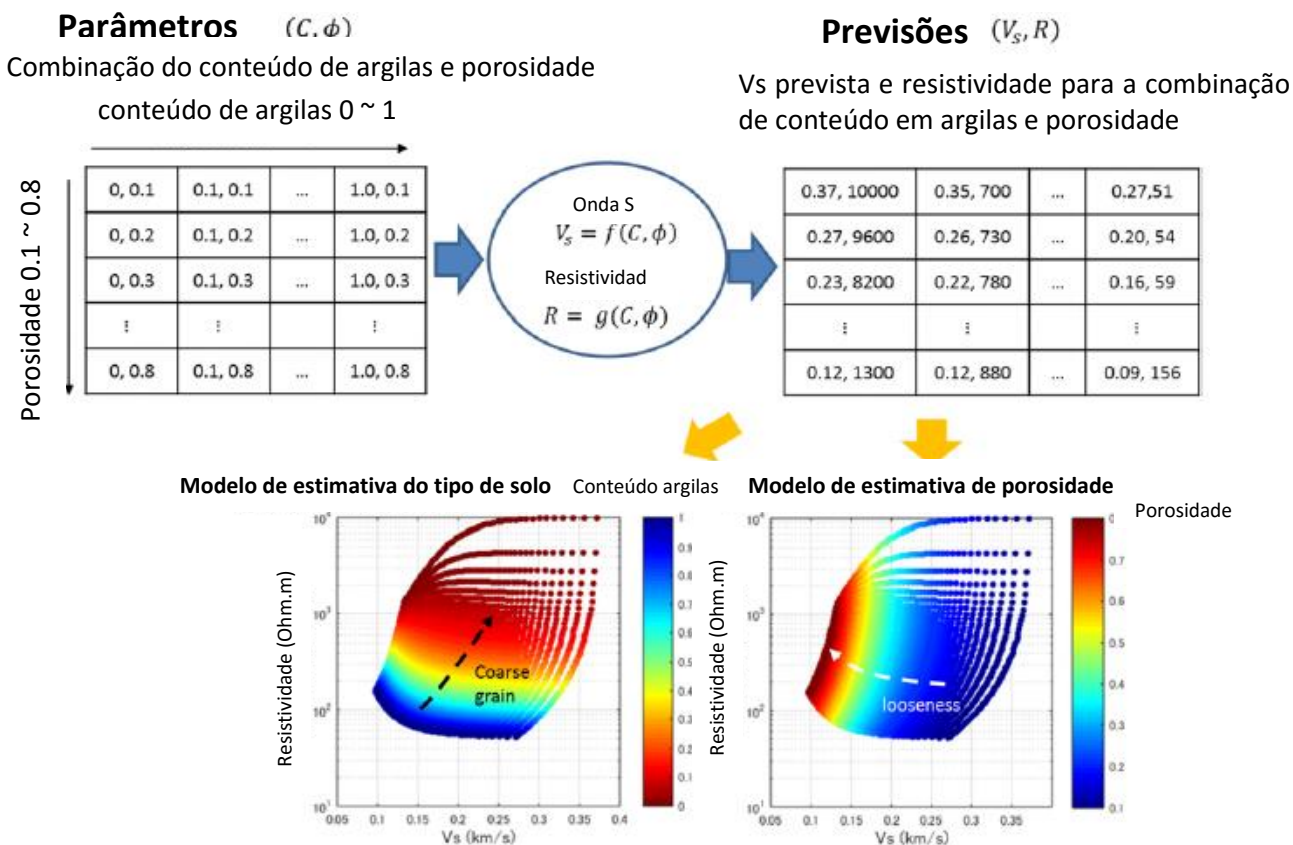


Figura 28 - Procedimento de estimativa de conteúdo argiloso e porosidade. Utilizado apenas para sedimentos não saturados e não consolidados. Retirado de (Konishi & Hashimoto, 2016)

É apresentado um exemplo com dados reais duma campanha feita. Tenta-se demonstrar a aplicabilidade da metodologia proposta usando esses dados. Os resultados são apresentados na Figura 29. Os dados são todos representativos de solos não saturados e por isso são usados os métodos antes referidos para este tipo de solo.

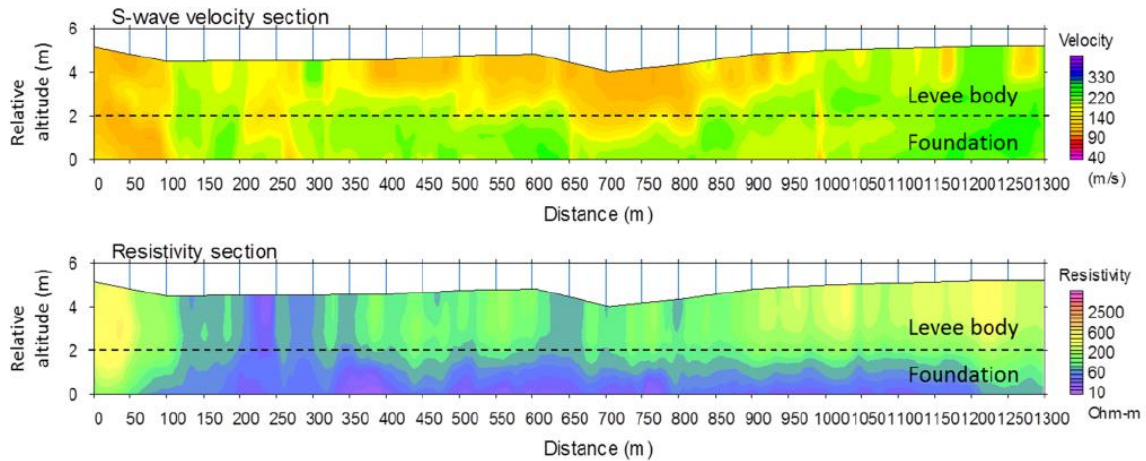


Figura 29 - Secção de velocidade de ondas S, em cima e secção de resistividade, em baixo. Retirado de (Konishi & Hashimoto, 2016)

Lendo os valores projetados nos dois modelos da Figura 29 em cada ponto é possível obter as secções de conteúdo em argila e porosidade. Usando outro método também conseguem calcular a vulnerabilidade do solo.

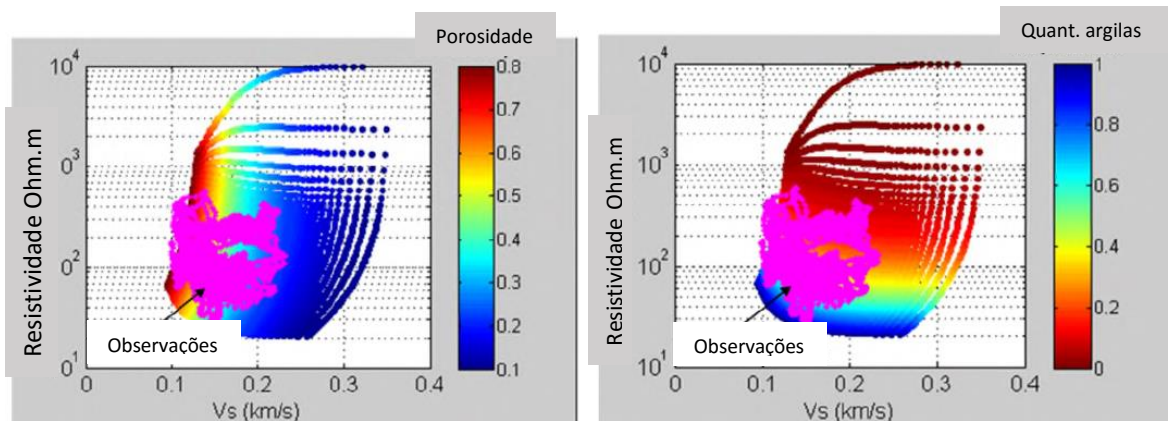


Figura 30 - Avaliação do conteúdo em argila e porosidade das medições de ondas S e resistividade usando os modelos. adaptado de (Konishi & Hashimoto, 2016)

Na Figura 30 vermelho indica solo mais solto e permeável o que correlaciona com o nível de perigo. Posteriormente foi feito um teste SPT e um furo nesse mesmo local que confirmou os resultados obtidos através deste modelo.

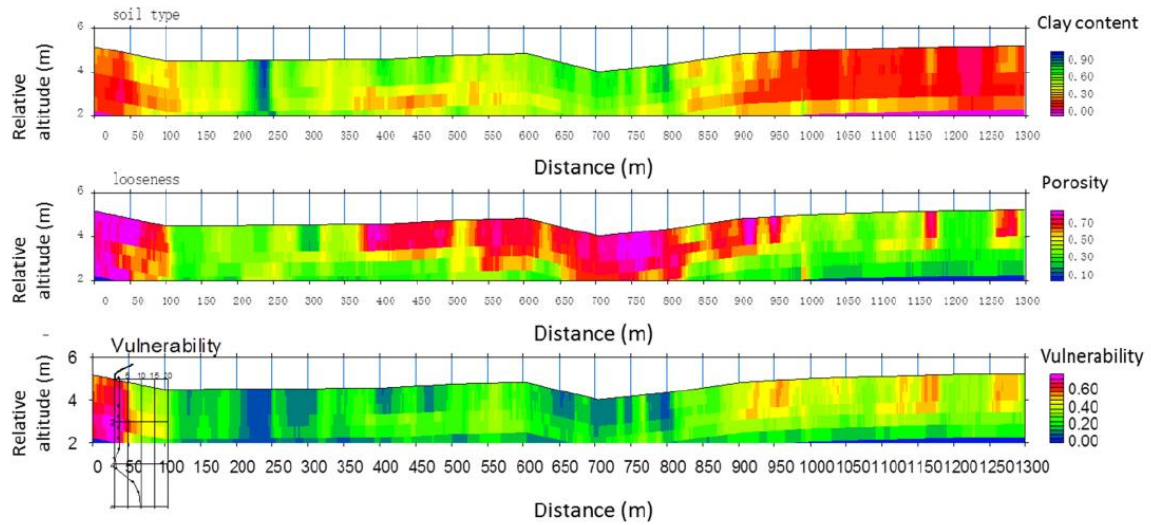


Figura 31 - Secções de conteúdo em argila estimado (no topo), porosidade (no meio) e vulnerabilidade (em baixo). O log do SPT está representado na figura de baixo e corresponde ao local avaliado mais vulnerável. Retirado de (Konishi & Hashimoto, 2016)

A avaliação das propriedades físicas do solo (porosidade, teor em água, etc) é fácil utilizando métodos habituais se houver amostras não perturbadas de solo. Para solos mais grosseiros é difícil obter essas amostras e para tal é necessário utilizar métodos mais complexos como o congelamento do solo (Hoffman & Robertson., 2000). Para além disso, o congelamento do solo implica a sua saturação o que impede o estudo de solos não saturados. Devido a estes problemas, (Cosentini & Foti, 2014) procuraram encontrar métodos alternativos de medição das características físicas em ambiente in-situ. Os métodos utilizados são a geofísica sísmica (v_p e v_s) e de resistividade. O seu trabalho propõe utilizar estes métodos para determinar a porosidade e o teor em água dum solo in-situ usando apenas relações empíricas. O modelo utilizado é baseado numa simplificação duma formulação para a propagação de ondas sísmicas em solos subsaturados proposta por (Conte, Consentini, & Troncone, 2009) e a Lei de Archie (Archie, 1942). É interessante compreender qual a formulação que correlaciona esses parâmetros porque não são feitas medidas de porosidade nem de teor de água, mas sabe-se que elas variam com o tempo.

Os autores obtiveram, entre outras, as seguintes equações:

$$V_p^2 = \frac{2a_{sk}G + \left[\frac{K^a K^w B + D}{LB + C} \right]}{R} \quad 31$$

Onde os parâmetros apresentados podem ser calculados utilizando as seguintes relações e onde G é o módulo de Rigidez, ν é o coeficiente de Poisson, K^w e K^a são os módulos volumétricos da água e do ar respetivamente, ρ_s , ρ_w e ρ_a são as densidades da fase sólida, líquida e do ar

respetivamente, θ_r e θ_{sat} são os valores residual e saturado do conteúdo volumétrico de água, Ψ é a matriz de sucção, α , n e m são parâmetros experimentais, S_r é o grau de saturação, σ e σ_w são as condutividades elétricas do solo e do fluido intersticial respetivamente e ϕ é a porosidade.

$$\begin{aligned}
 R &= (1 - \phi)\rho_s + \Gamma\phi^{Q+1}\rho_w + \phi(1 - \Gamma\phi^Q)\rho_a \\
 L &= \phi[K^a\Gamma\phi^Q + K^w(1 - \Gamma\phi^Q)] \\
 B &= -M(\Gamma\phi^{Q+1} - \theta_r)^{\left[\left(\frac{1}{m}\right)+1\right]}\lambda\left[(\Gamma\phi^{Q+1} - \theta_r)^{-\frac{1}{m}}\lambda^{-1} - 1\right]^m - \frac{3\beta_{sk}}{G}\Gamma^2\phi^{2Q} \\
 C &= \Gamma\phi^{Q+2}(1 - \Gamma\phi^Q) \\
 D &= \Gamma\phi^{Q+1}(1 - \Gamma\phi^Q)[K^w\Gamma\phi^Q + K^a(1 - \Gamma\phi^Q)] \\
 \Gamma &= \left(\frac{\sigma}{\sigma_w}\right)^{\frac{1}{q}} \\
 Q &= -\frac{P}{q} \\
 \alpha_{sk} &= \frac{1 - v^{sk}}{1 - 2v^{sk}} \\
 \beta_{sk} &= \frac{1 - 2v^{sk}}{2(1 + v^{sk})} \\
 M &= \alpha mn \\
 \lambda &= \frac{1}{(\theta_{sat} - \theta_r)^{\frac{1}{m}}}
 \end{aligned}$$

Para ter em conta o efeito da sucção no módulo de Rigidez (G), uma relação apropriada é necessária para avaliar a Equação 31.

Muitos autores propuseram relações para a influência da sucção no módulo de rigidez: (Wu, Gray, & Jr., 1984), (Qian, Gray, & Woods, 1993), (Marinho, Crilly, & Chandler, 1995), (Mancuso, Vassalo, & d'Onofrio, 2002), (Fratta, Alshibli, Tanner, & Roussel, 2005), (Kawajiri, Sibuya, Kato, & Kawaguichi, 2011) e (Oh & Vanapalli, 2011). Por exemplo, desprezando efeitos anisotrópicos, para materiais normalmente consolidados uma equação pode ser usada (Mancuso, Vassalo, & d'Onofrio, 2002).

$$G = A f(e) \left[\frac{(p - u_a) + \Psi}{p_r} \right] \quad 32$$

Onde A é o índice de rigidez, p é a pressão média total, u_a é a pressão do ar, Ψ é a sucção, p_r é a pressão de referência, b é um parâmetro de ajuste e $f(e)$ é a função da porosidade e .

Foi também obtida a seguinte relação que descreve a influência da sucção no módulo de rigidez.

$$G(s) = G_{sat} \left\{ 1 + \left[\frac{\Psi_{res} - \Psi_{aev}}{2\rho_r} \left(-\frac{\partial\theta}{\partial\Psi} \Psi \right)^{\left(\frac{n}{2}\right)\left(\frac{m}{1-m}\right)} \right] \times (1 - S_r)^{\frac{m}{1+m}} \right\} \quad 33$$

Onde G_{sat} é o módulo de rigidez sob condições saturadas, Ψ_{res} é o valor de sucção residual, Ψ_{aev} é o valor de entrada de ar, ρ_r é a pressão de referência e n e m são parâmetros da equação de Van Genuchten. Esta expressão reproduz a variação da rigidez com o grau de saturação com uma função contínua e sem introduzir parâmetros adicionais. A relação dada pela Equação 33 também tem em conta que a evolução da sucção depende da variação do grau de saturação logo os efeitos de sucção no módulo de rigidez têm de ser associados com a curva de retenção de água do solo.

A equação 32 pode ser utilizada para desenhar um diagrama onde cada curva descreve como a condutividade elétrica (σ) e a velocidade de ondas (V_p) variam quando a porosidade é fixa e o grau de saturação aumenta ou vice-versa. A Figura 32 exemplifica uma areia. No diagrama, a porosidade é limitada de 0.2 a 0.8, valores típicos em solos e a saturação assume-se que varia entre 0.01 e 1.00. Os parâmetros utilizados nas equações e os valores padrão assumidos encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4- Parâmetros da Lei de Archie, equação de van Genuchten e equação (a do gráfico) usados para desenhar o diagrama velocidade-condutividade na Figura 22. Retirado de (Cosentini & Foti, 2014)

Van Genuchten*		Archie**		Equação (32)***		Parâmetros assumidos	
$\alpha: \text{kPa}^{-1}$	0.350	$\sigma_w: \text{mS/cm}$	0.7	A	140000	$\rho_s: \text{KN.s}^2/\text{m}^4$	2.767
n	3.190	p	1.5	f(e)	$1/(0.3+0.7e^2)$	$\rho_w: \text{KN.s}^2/\text{m}^4$	1.000
m	0.687	q	2.0	b	0.5	$\rho_a: \text{KN.s}^2/\text{m}^4$	0.001
θ_{sat}	0.370			$P_r: \text{kPa}$	100	$K^a: \text{kPa}$	1.45×10^2
θ_r	0.058					$K^w: \text{kPa}$	2.25×10^6
						v^{sk}	0.15-0.35

* (Tuller & Or, 2004); ** (Mitchell & Soga, 2005); *** (Hardin & Blandford, 1989)

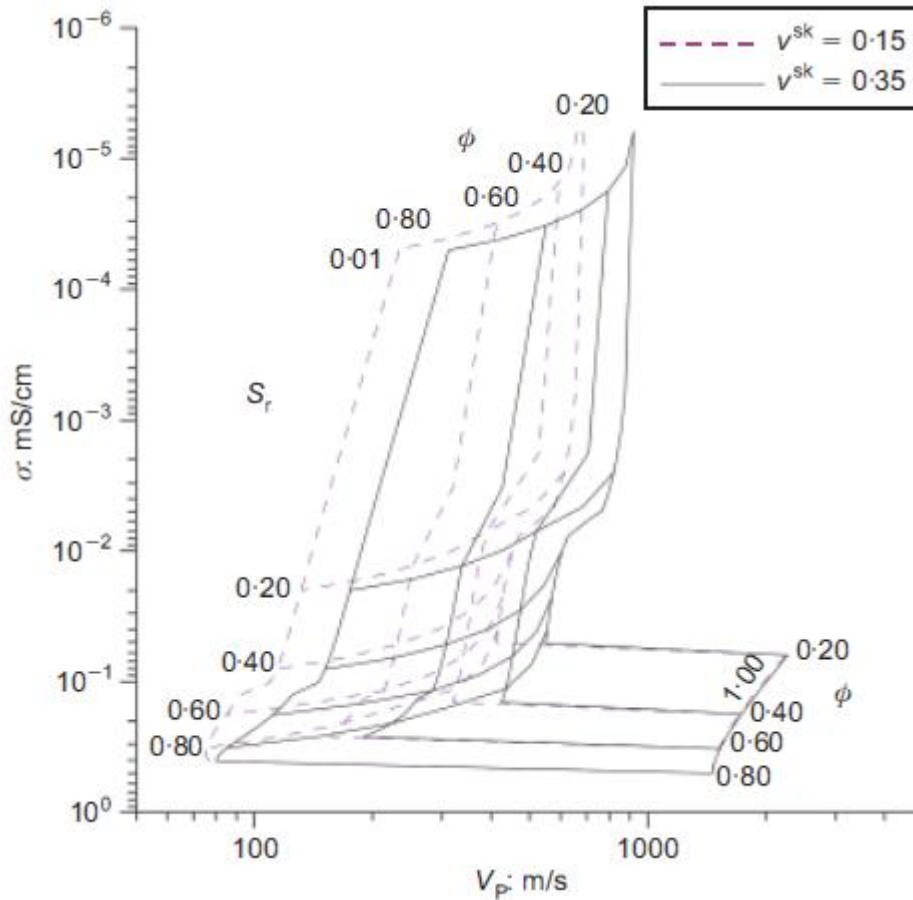


Figura 32 - Exemplos de diagramas de velocidade e condutividade como um função de porosidade e grau de saturação para dois valores de coeficiente de Poisson. (Cosentini & Foti, 2014)

Um diagrama deste tipo pode ser usado para uma avaliação preliminar da porosidade e do grau de saturação apenas fazendo medições de ondas P e condutividade (inverso da resistividade).

O efeito do coeficiente de Poisson na avaliação da porosidade e do grau de saturação é demonstrado na Figura 32, onde dois diagramas condutividade-velocidade para $v^{sk}=0.15$ (tracejado) e $v^{sk}=0.35$ (a cheio) estão projetados. Em particular, na linha de saturação entre 0.9 e 1 é possível observar uma zona lisa em que a influência do coeficiente de Poisson pode ser ignorada. Em geral, este coeficiente tem um controlo significativo na avaliação da porosidade e menos influência no grau de saturação.

Foram efetuadas medições experimentais de velocidades P e S para diferentes graus de saturação (Figura 32). Estes dados serão úteis para comparação com os valores obtidos no nosso trabalho.

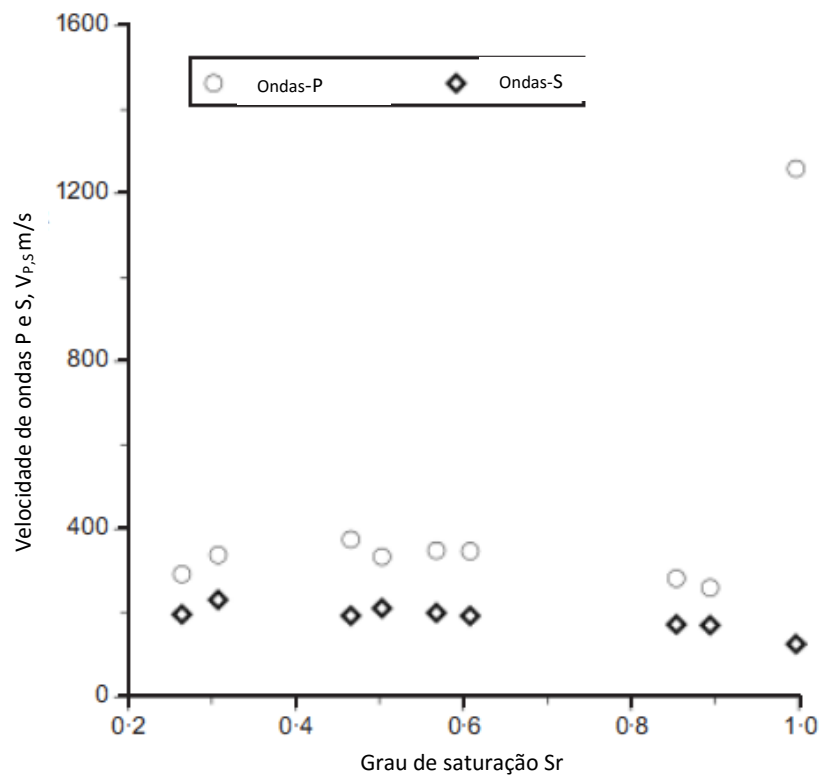


Figura 33 - Velocidades medidas em laboratório com diferentes graus de saturação. (Cosentini & Foti, 2014)

Finalmente, foi desenhado um digrama usando as Equações 32 e 33 (Figura 34). A figura mostra a velocidade de ondas P e os valores médios de condutividade medidos em laboratório num digrama velocidade-condutividade. Os parâmetros utilizados no cálculo deste diagrama são obtidos experimentalmente e encontram-se na Tabela 5. Os dados obtidos experimentalmente, ϕ e S_r , estão próximos da linha de porosidade de 0.4 no intervalo de grau de saturação de 0.2-1.0.

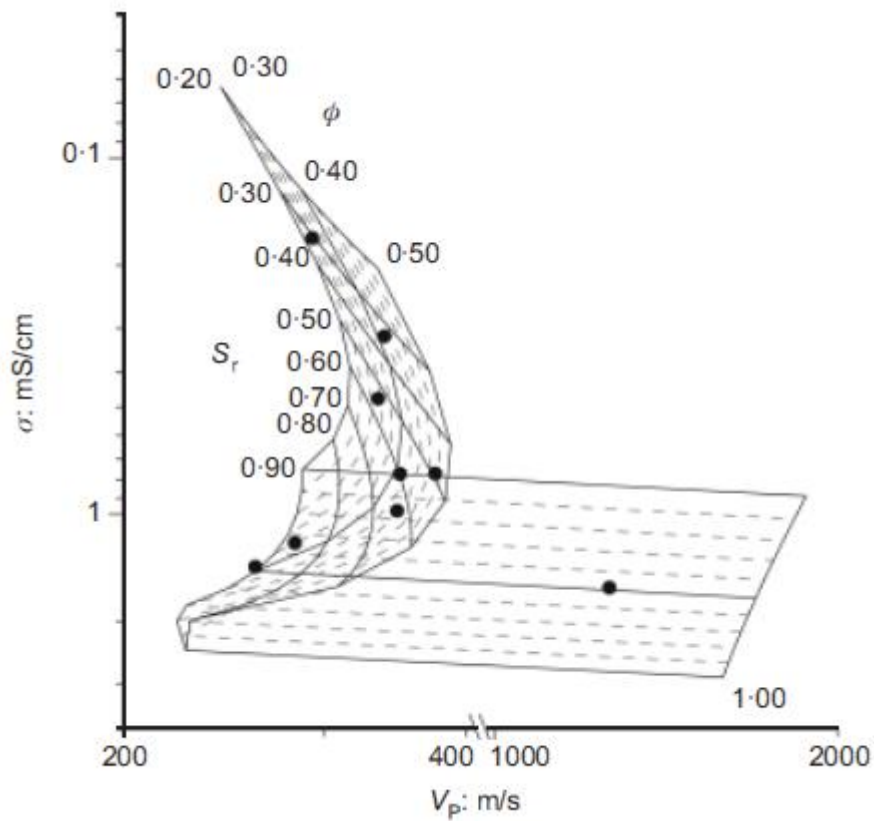


Figura 34 - Diagrama de velocidade-condutividade com dados experimentais. (Cosentini & Foti, 2014)

Tabela 5 – Parâmetros apropriados para a Lei de Archie, a equação de van Genuchten e para a equação (a segunda) para as amostras laboratoriais. (Cosentini & Foti, 2014)

Van Genuchten		Archie		Equação 33		Parâmetros assumidos	
$\alpha: \text{kPa}^{-1}$	0.40	$\sigma_w: \text{mS/cm}$	13.98	$\Psi_{\text{res}}: \text{kPa}$	30	$\rho_s: \text{KN.s}^2/\text{m}^4$	2.767
n	2.00	p	2.29	$\Psi_{\text{aev}}: \text{kPa}$	1	$\rho_w: \text{KN.s}^2/\text{m}^4$	1.000
m	0.50	q	1.64	$G_{\text{sat}}: \text{kPa}$	33182	$\rho_a: \text{KN.s}^2/\text{m}^4$	0.001
θ_{sat}	0.40					$K^a: \text{kPa}$	1.45×10^2
θ_r	0.04					$K^w: \text{kPa}$	2.25×10^6
						v^{sk}	0.15-0.35

4. Ferramentas de Aquisição

Neste trabalho foram utilizadas várias ferramentas de aquisição em Labview e em Matlab. Algumas foram criadas especificamente para este efeito. Neste capítulo explica-se quais foram, como foram criadas e como são utilizadas.

4.1. DAQ

Para fazer a aquisição, no sistema foi utilizada um sistema de aquisição de dados (DAQ). *Data acquisition* ou aquisição de dados é o processo de fazer amostragem sob a forma de sinais que medem ou traduzem condições físicas do mundo real e os converte em valores numéricos digitais que podem ser manipulados por um computador.

Data acquisition systems (DAQ) ou sistemas de aquisição de dados, tipicamente convertem ondas analógicas em valores digitais para processamento.

As componentes duma DAQ incluem sensores que convertem parâmetros físicos em sinais elétricos, um circuito de condicionamento de sinal para converter os sinais do sensor numa forma em que possam, posteriormente, ser convertidos em valores digitais e conversores analógico-digital que convertem sinais condicionados do sensor em valores digitais. (ARM - The Architecture for the digital world, s.d.)



Figura 35 – DAQ da National Instruments

Fonte: (ARM - The Architecture for the digital world, s.d.)

4.2. Labview e formato .vi

Neste trabalho a aquisição dos dados foi feita com recurso a um programa, *LabView*. O *LabVIEW* (ou *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é o *software* base da plataforma de projeto da *National Instruments*. Usa uma linguagem visual de programação por objetos, o que reduz a complexidade sem perder a eficácia. É utilizado no desenvolvimento de qualquer sistema de medição ou controlo. Integrando todas as ferramentas de que os engenheiros e cientistas

precisam para desenvolver uma ampla gama de aplicações num tempo significativamente menor, o *LabVIEW* é um ambiente de desenvolvimento voltado à resolução de problemas com produtividade acelerada. Pode-se utilizar em variadas plataformas como, *Microsoft Windows*, variadas versões do *Linux*, *UNIX* e *Mac OS X*.

As sub-rotinas, funções ou programas gerados em *LabVIEW* são chamadas VIs (*virtual instruments*). Cada VI tem duas componentes, um bloco diagrama e um painel frontal.

O painel frontal é construído usando controlos e indicadores. Controlos são *inputs* que permitem fornecer informação à VI e os indicadores são os *outputs* e indicam ou mostram os resultados baseados nos inputs dados à VI. O bloco diagrama, contém o código gráfico, todos os objetos colocados no painel frontal aparecem no bloco diagrama. Este painel também contém as estruturas e funções que fazem as operações nos controlos e fornecem os dados aos indicadores.

Coletivamente, controlos, indicadores, estruturas e funções são chamadas nodes. Estes nodes são ligados uns aos outros usando linhas. Deste modo a VI pode ser corrida como um programa com o painel frontal a servir como uma interface de utilizador.

Esta abordagem gráfica permite que não programadores “escrevam” programas simplesmente usando representações virtuais de equipamento de laboratório com que estarão familiarizados (ARM - The Architecture for the digital world, s.d.).

4.3. TANAGRA – Data Mining Software

O programa TANAGRA é um *freeware* de data *mining* desenhado para utilização em investigação e fins académicos. Permite a utilização de vários métodos de data *mining* que incluem *exploratory data analysis*, *statistical learning*, *machine learning* e *databases area*.

O programa contém *supervised learning* mas também outros paradigmas como *clustering*, *factorial analysis*, *parametric and nonparametric statistics*, *association rule*, *feature selection* e *construction algorithms*...

TANAGRA é um projeto de *open source* tendo em conta que qualquer investigador pode aceder ao *source code* e adicionar os seus próprios algoritmos, desde que concorde e se conforme com a licença de distribuição do *software*.

O objetivo principal do projeto é dar aos estudantes, professores e investigadores um programa com estas habilidades que seja gratuito e de fácil utilização conformando com as normas atuais do desenvolvimento do *software* neste domínio (especialmente no design da sua GUI e a sua forma de utilização), e permitir a análise de dados sintéticos ou reais.

O segundo objetivo do projeto é propor aos investigadores uma arquitetura que lhes permita adicionar os seus próprios métodos de *data mining*, para comparar as suas performances. O programa funciona mais como uma plataforma experimental para os deixar chegar ao essencial do seu trabalho, dispensando-os ter de lidar com a parte aborrecida de programar este tipo de ferramentas; gestores de dados.

O terceiro e último objetivo, direcionado a programadores pouco experientes, consiste em difundir uma possível metodologia para contruir este tipo de programa. Devem tomar partido do acesso livre ao *source code*, para entenderem como este tipo de programa é construído, os problemas a evitar e os principais passos do projeto, e quais as ferramentas e bibliotecas de código usar. Deste modo, o Tanagra pode ser considerado um instrumento de aprendizagem para técnicas de programação. (Rakotomalala, 2005).

4.4. Geofones

Os geofones utilizados medem vibrações através do efeito de indução elétrica. São geofones horizontais de 28Hz.

O funcionamento do geofone é um aproveitamento inteligente do efeito de corrente induzida numa bobina. Um íman move-se relativamente a uma bobina presa a uma mola que faz com que se gere corrente induzida na mesma bobina. O movimento relativo gera uma corrente que terá como sinal positivo ou negativo dependendo do sentido em que o sistema se move. Obtém-se um sinal elétrico que representa a onda que atinge o geofone. Existe também o problema do ruído que não é mais do que sinal sem correlação à onda física que se procura. Pode ter origem em vibrações paralelas que existam, normalmente de mais alta frequência, deficiências no próprio geofone ou instrumento de aquisição, ou fugas de corrente que existam em qualquer parte do sistema.



Figura 36 - Geofones utilizados

4.5. Resistivímetro

O resistivímetro utilizado SAS300 permite ligar 2 elétrodos de corrente, os que geram corrente no solo, e 2 elétrodos de potencial, os que medem a diferença de potencial no intervalo escolhido. Do lado esquerdo ligam-se os elétrodos de potencial e do lado direito, os de corrente. O aparelho permite também decidir qual a quantidade de corrente que se faz passar no solo. Pode-se também decidir quantas leituras o aparelho faz por ensaio; 1, 4, 8, 16, 32 ou 64. Neste trabalho optou-se por se fazer sempre 4 e utilizar a médias das mesmas.



Figura 37 - Resistivímetro utilizado

4.6. Elétrodos

Os elétrodos utilizados são tubos de cobre para maximizar a condutividade cravados em cabos com revestimento espesso (para evitar fugas de corrente). Esses elétrodos são ligados depois a um ligador que faz a ligação ao resistivímetro.



Figura 38 - Elétrodo de corrente



Figura 39 - Elétrodo de Potencial

4.7. Defletómetro

O defletómetro foi o instrumento usado para medir assentamentos. O instrumento deve estar posicionado numa base fixa e a sua extremidade deve estar contra o objeto cujas variações se pretende medir. Os valores medidos são dados em unidades de distância. O aparelho mede deslocamentos.

O defletómetro elétrico é ligado a um aparelho que faz a conversão da variação de resistências em deformações no mesmo.

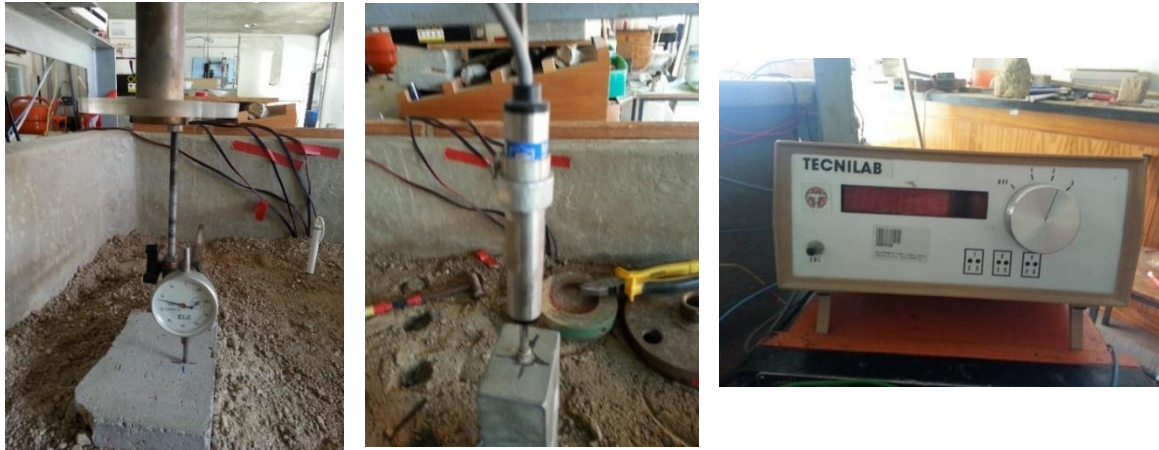


Figura 40 - Defletómetros (à esquerda mecânico e à direita elétrico (LVDT)) e conversor do defletómetro elétrico.

4.8. Edómetro

Para o efeito deste trabalho foi desenvolvida uma câmara utilizável num ensaio edométrico clássico, mas com a capacidade de medição de resistividade ao longo do mesmo ensaio.



Figura 41 - Malha condutora aplicada na câmara (à esquerda); Câmara de PVC com elétrodos na lateral (centro); Ensaio edométrico com medição de resistividade (à direita).

Foi colocada uma malha metálica condutora no topo e na base câmara sobre a pedra porosa (Figura 41, esquerda). Posteriormente foram soldados dois elétrodos de corrente, um em cada malha. Os elétrodos de potencial foram colocados no interior da câmara metálica pregados numa outra câmara de PVC que entra em contacto com o solo (Figura 41, centro). Os 4 cabos foram depois ligados ao mesmo resistivímetro SAS300 utilizado para fazer as medições à medida que se aumentou a carga no topo da câmara.

5. Materiais & Métodos

Neste capítulo pretende-se expor quais os materiais utilizados neste trabalho. Também se explicam todos os métodos de aquisição e processamento dos dados obtidos ao longo do mesmo.

5.1. Solo

Para o efeito desta experiência foi utilizado um solo arenoso com silte e argila oriundo da camada de cobertura recolhido no Campus da Universidade de Aveiro. Foi feita uma análise granulométrica utilizando 100g de amostra representativa. Foram utilizados nove peneiros (8mm; 4mm; 2mm; 1mm; 0.5mm; 0,25mm; 0,125mm; 63µm e 38µm) e a separação foi feita em via húmida. Após a secagem das amostras separadas foi feita a sua pesagem.

Tabela 6 - Peneiros – Massas medidas e calculadas.

Peneiro (micra)	Massa retida (g)	Retida (%)	Retida e acumulada (%)	Passado (%)
8	0	0	0	100
4	8,33	8,47	8,47	91,52
2	12,67	12,92	21,39	78,60
1	15,39	15,65	37,05	62,94
0,5	17,95	18,26	55,32	44,67
0,25	17,79	18,10	73,42	26,57
0,125	8,92	9,07	82,50	17,49
0,063	3,27	3,33	85,83	14,16
0,038	3,30	3,35	89,19	10,80
Fundo	10,62	10,80	100	0
Total	98,28	100		

As percentagens passadas calculadas foram utilizadas para desenhar a curva granulométrica (Figura 45). Posteriormente à análise, utilizando as massas foi estimada a percentagem de passados para um peneiro hipotético de $2\mu\text{m}$, granulometria das argilas. O valor foi estimado logaritmando os dados e obtendo a reta de correlação usando o método Gates-Gaudin-Schuman (kawatra, s.d.).

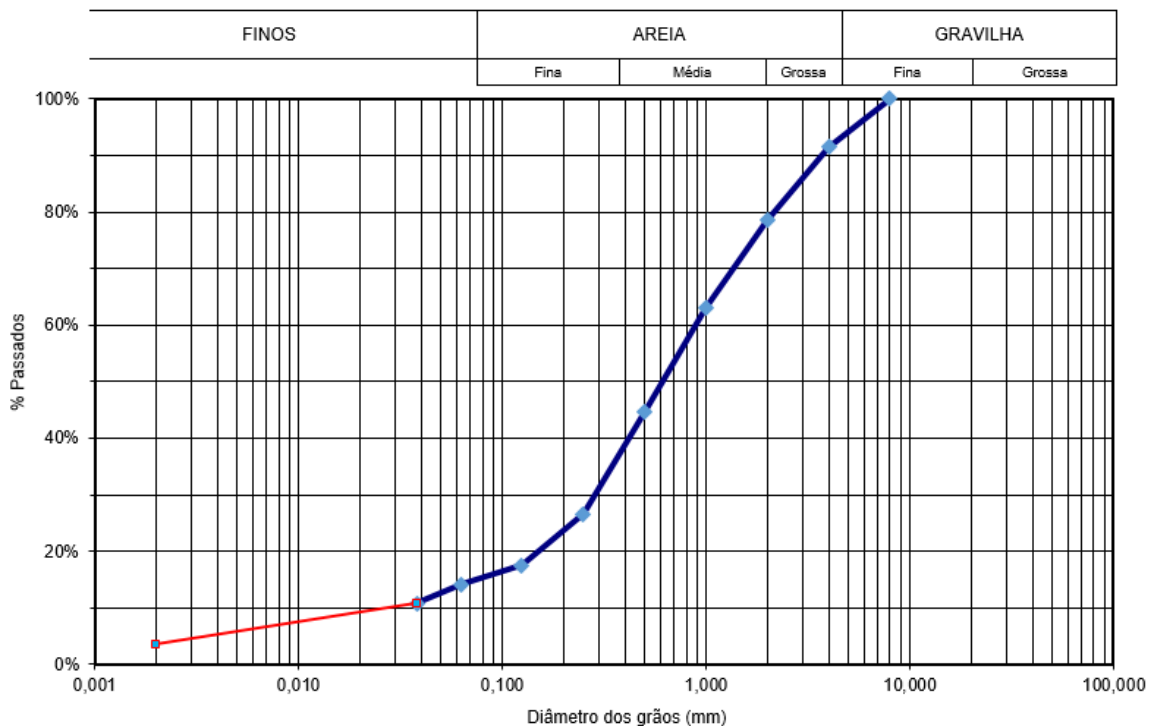


Figura 42 - Análise granulométrica do solo utilizado.

5.2. Tanque (características)

Para esta experiência foi usado um tanque de fibra de vidro com cerca de $1,3 \text{ m}^3$.

Metade do tanque foi enchido com o solo descrito no capítulo 5.1. que foi compactado em camadas de 10cm cada à medida que estavam a ser colocadas. Foram colocadas 7 camadas de solo. Cada camada levou 7 baldes de 15 litros de solo numa tentativa de uniformizar a compactação à medida que se fez o enchimento. Cada camada tem um peso aproximado de 131kg e um volume de $0,067 \text{ m}^3$ e, conseqüentemente o solo tem um peso volúmico aproximado a 1954 kg/m^3 . Foram colocados simultaneamente geofones e eléctrodos camada a camada. Na base, pré enchimento, foi colocado um eléctrodo de potencial e foi coberto com 6cm de cascalho. A colocação do cascalho tem como objetivo permitir uma melhor e mais uniforme absorção da água quando esta é colocada do lado vazio do tanque. Desta maneira, a água consegue penetrar

todo o solo (horizontalmente) antes de haver capilaridade significativa o que uniformiza essa capilaridade em plano horizontal.



Figura 43 - Colocação do elétrico de corrente (à esquerda); Colocação do primeiro geofone (à direita).

Pós enchimento, o tanque encontra-se com 1 elétrico de corrente, 5 de potencial e 5 geofones (com 10cm de espaçamento entre si). Colocou-se no topo outro elétrico de corrente.

Também no topo do solo foi colocado um defletômetro para determinar os deslocamentos verticais aquando se faz variar o teor em água. Estas geometrias estão descritas na Figura 46. Ambos os geofones e os elétricos encontram-se a 40cm da parede de fundo do tanque.

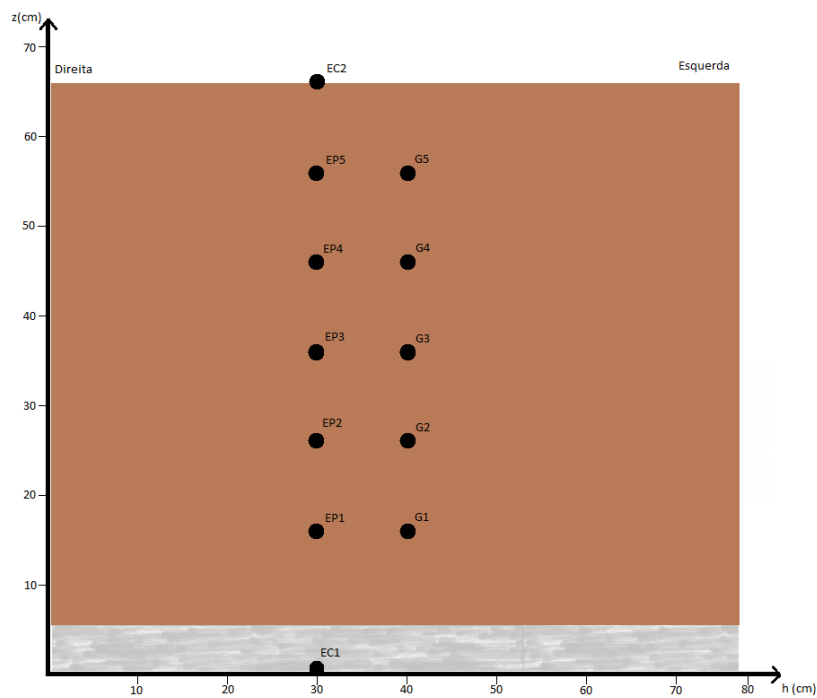


Figura 44 - Geometria do tanque da direita para a esquerda (visto do lado de traz do tanque)

O espaço, que mais tarde é cheio com água, permite uma absorção contínua e natural da água pelo solo. Deste modo é possível estudar, de um modo natural, a variação da velocidade de propagação das ondas e da resistividade com a variação do teor em água ao longo do tempo. Comparativamente à montagem no projeto de (Cruz, 2010), esta abordagem é ligeiramente diferente da outra pois o tanque encontrava-se totalmente preenchido com solo e era necessário, manualmente, humedecer o solo e não era possível controlar facilmente o nível da água. Este processo leva a uma variação pouco natural do teor em água.



Figura 45 - Tanque utilizado nos ensaios

As coordenadas na Figura 44 e em outras situações ao longo deste projeto são retiradas usando um instrumento criado para o efeito colocado no topo do tanque (Figura 46).



Figura 46 - Instrumento de aquisição de coordenadas x e z.

Nota: O solo tinha alguma humidade quando se colocou em camadas no tanque. Humidade essa que inicialmente não era uniforme. No entanto, como neste trabalho não se procuram valores

absolutos, mas sim variações no tempo, a comparação dos valores medidos com os valores de referência tirados no início da experiência são adequados.

5.3. Sistema de aquisição - Sísmica (Circuito Utilizado)

A aquisição de dados é feita usando uma DAQ. Ligaram-se os 5 geofones (10 canais/20 cabos) à ranhura de *input* analógico e foi necessário criar um *trigger* ou sistema de disparo que, automaticamente, começasse a contar o início do ensaio. O trigger é composto por cabos condutores, uma pilha (1.5V), um martelo com cabeça de metal condutor e um ferro onde se bate com o martelo. O circuito ilustrado na Figura 48, está aberto em todos os momentos à exceção do tempo zero quando há contato entre o martelo e o ferro para fornecer um pico de tensão permitindo, deste modo, à DAQ iniciar a aquisição de voltagens dos geofones soterrados. Deste modo a pancada funciona tanto como trigger, como fonte.



Figura 47 - DAQ, pilha, martelo e ferro utilizados no circuito

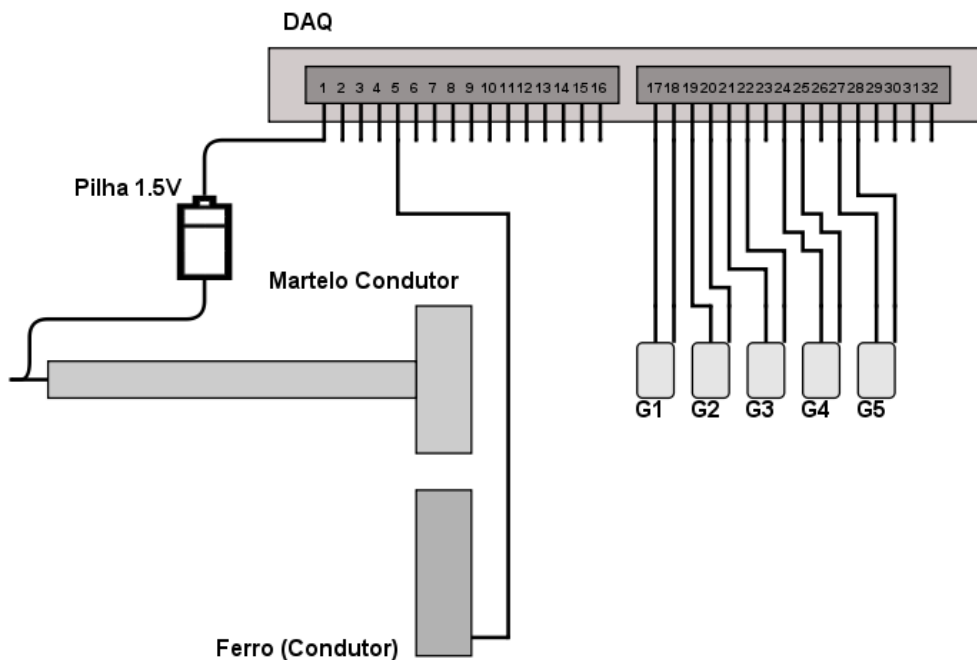


Figura 48 - Circuito utilizado na sísmica. (G=Geofone)

5.4. Sistema de Aquisição – Elétrica (Circuito Utilizado)

O método elétrico utilizado estuda a resposta do terreno quando uma corrente elétrica se propaga nele.

Para tal existem 2 elétrodos de correntes colocados no solo, um na base e outro no topo.



Figura 49 - Eléttrodo de corrente Inferior.

Para medir a diferença de potencial que se verifica no solo existem outros 5 elétrodos, colocados na vertical, com um espaçamento de 10cm entre si. A Figura 44 apresentada no capítulo representa esta geometria.

Todos os elétrodos de potencial estão conectados a um ligador (Figura 50) que serve para alterar facilmente quais os elétrodos de potencial em uso. Apenas dois destes são usados em cada medida, juntamente com os dois elétrodos de corrente de modo a medir resistências no intervalo entre os de potencial. Os elétrodos de corrente e os dois de potencial ficam então ligados a um resistivímetro que não só gera corrente no solo como imediatamente retira valores de resistividade. O ensaio é repetido 4 vezes em cada intervalo e o valor médio é usado.



Figura 50 - Eléttrodos de potencial, esquerda; de corrente, direita.

O elétrodo de corrente superior liga diretamente no resistímetro pois sendo sempre utilizado (tal como o inferior) não houve necessidade de fazer mais ligações. Para os elétrodos de potencial, sempre que se muda de intervalo apenas se move a parte de cima da peça branca para a direita ou esquerda tendo em conta que o cabo verde e o cabo verde-amarelo, à esquerda, estão ligados ao resistímetro e os azuis e vermelhos vêm do solo.

Relembra-se que os valores medidos são resistência, valores absolutos medidos pelo resistímetro, e não resistividades, propriedade intrínseca do solo.

5.5. Sistema de medição do assentamento

Como referido no capítulo anterior, neste trabalho mede-se o assentamento do solo aquando a sua humedificação. Para tal utilizaram-se dois defletómetros afixados a uma barra no topo do tanque e sobre um bloco de cimento que se acoplou na superfície do solo. Primeiro utilizou-se o mecânico e depois o elétrico, numa procura de maior precisão

5.6. DAQ (Características)

A DAQ utilizada é o modelo NI USB 6215.

Tem gama dinâmica de 16bits e 32 canais analógicos dos quais, neste trabalho, são utilizados 6 canais. Tem ainda 8 linhas de *input* digital e 8 linhas de *output* digital.

Requer a instalação do *software* para o *Labview* a reconhecer.

5.7. Programação da VI

Esta VI foi criada com o objetivo de ler dados analógicos, sob a forma de diferenças de potencial, oriundos dos geofones inseridos no solo.

O bloco diagrama (Figura 51) começa por fazer o *Load* dos dados que vêm da DAQ. De seguida, transforma esses dados (voltagem) em sinais de amplitude/tempo que toma a forma de onda no Painel Frontal.

No Bloco Diagrama colocam-se também os objetos que permitem definir o número de *samples* (amostras) e o *rate* (frequência de amostragem) com que se faz a aquisição dos dados. Coloca-se o visualizador e o objeto que permite guardar os sinais sísmicos em ficheiro. Finalmente, insere-se uma função que permite gravar os dados obtidos.

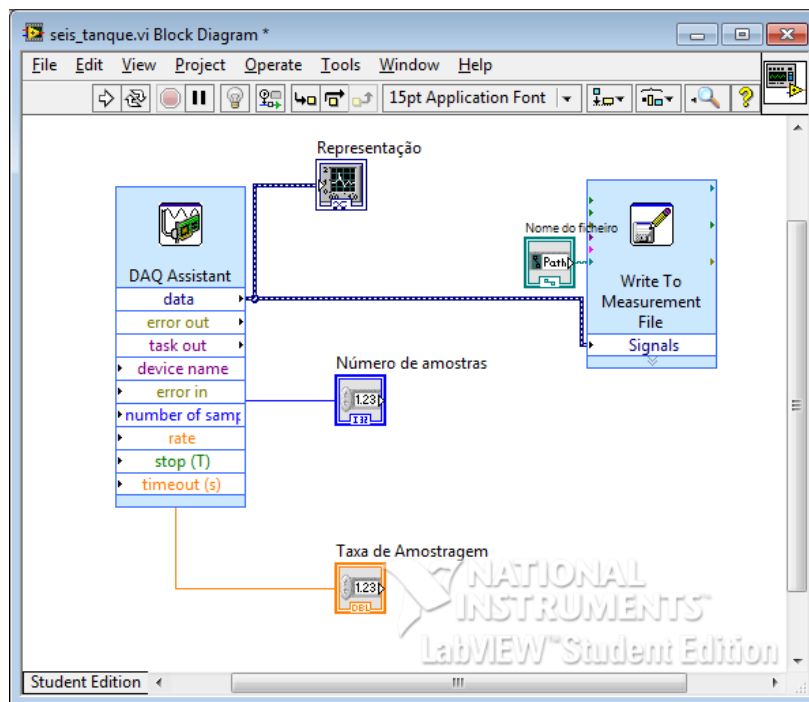


Figura 51 - Bloco Diagrama da VI

No Painel Frontal (Figura 52) é onde se define o *rate*, *samples* e o ficheiro onde se guardam os dados transformados. É também onde se pode ter uma primeira vista das ondas. Esta possibilidade é uma grande ajuda pois permite perceber facilmente se houve algum problema com a aquisição.

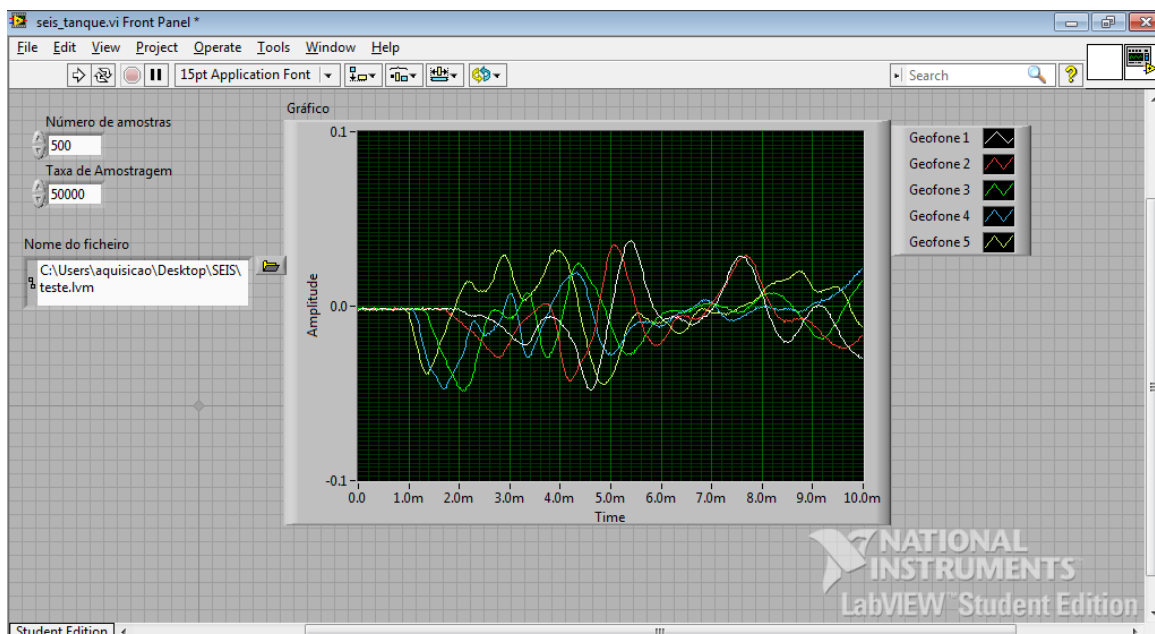


Figura 52 - Painel frontal da VI

5.8. Aquisição dos dados

Para se fazer a aquisição corre-se a VI no *LabView*, o que significa que, o programa, fica em standby à espera do *trigger* para iniciar a aquisição. Disparando, que essencialmente consiste em fechar o circuito dando uma pancada seca com o martelo no ferro encostado numa das zonas de tiro, o programa inicia a aquisição e geram-se ondas mecânicas.

São dados 5 tiros, no lado do tanque como ilustrado na Figura 54, fazendo uma tomografia. Os tiros são feitos à altura do solo e de 10 em 10 cm para baixo. A zona onde se bate é desviada de 23cm do plano onde se encontram os geofones e elétrodos para evitar alguma transmissão de energia através dos cabos e dos sensores. Idealmente far-se-iam 5 tiros de cada lado, mas do lado esquerdo as velocidades obtidas eram consideravelmente superiores ao esperado e às do lado direito. Acredita-se que isto acontece devido à posição dos cabos dos geofones. O caminho mais curto entre o geofone e parede (onde se bate) é exatamente onde se encontram os cabos que transmitem energia acústica mais rápido que o solo envolvente. Quando o sistema foi montado planeava-se que os tiros fossem feitos em cima do solo e não do lado logo, a geometria não foi devidamente preparada para estar protegida de erros nesta situação.



Figura 53 - Posições de tiro (a vermelho)

Desta forma é possível fazer um “varrimento” do solo pois cada tiro é recebido em 5 geofones diferentes e esses mesmos geofones recebem também das outras posições o que permite determinar velocidades em vários planos. A Figura 54 ilustra este problema.

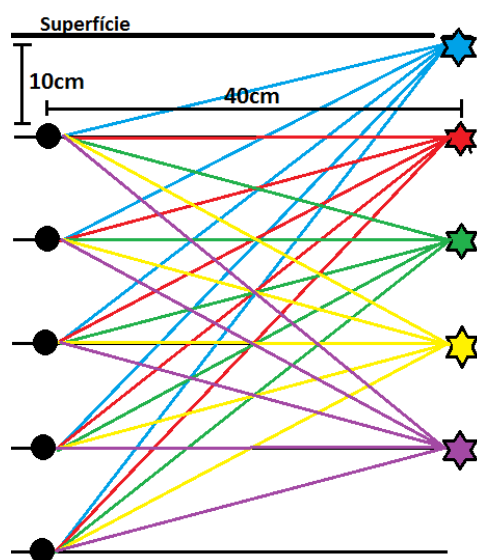


Figura 54 - Ilustração simples da tomografia

É de notar que na figura os geofones aparentam estar no mesmo plano dos pontos de tiro, mas na realidade têm um desfasamento de 23cm.

Os dados são todos adquiridos com uma taxa de amostragem de 50000Hz, com um número de amostras variável, dependendo da necessidade.

Os dados obtidos neste processo são valores de amplitude em função do tempo. É apresentado, em anexo, um exemplo de um ficheiro obtido através deste método de aquisição.

Como se pode verificar, nesta forma, os dados não dão qualquer indício das velocidades de ondas P. Todo o processamento é feito posteriormente em *MatLab*.

5.9. Processamento em MatLab

O processamento dos sinais sísmicos adquiridos em *LabView* é feito em *MatLab*. Foi escrito um script que determina velocidades para as várias camadas usando os dados de todos os tiros, é também possível obter as velocidades entre cada geofone e a zona de tiro. Determinam-se primeiras chegadas das ondas P analisando os registos e fazendo o *picking* usando a função *ginput* (*Mais sobre isto em baixo*). Neste capítulo são apresentados passos de processamento. O *script* encontra-se em anexo.

5.9.1. O script

De um modo sucinto pode descrever-se o funcionamento do script da seguinte maneira:

1. Clear all; Close all; clc servem apenas para reiniciar a área de trabalho do MatLab cada vez que se corre o programa. Limpa todas as variáveis, fecha gráficos...;
2. Define-se a escala a usar e se se quer usar *dampening* (neste caso não foi usado => damp=0);
3. Load dos ficheiros provenientes da aquisição em LabView;
4. Define-se a geometria de tiros/geofones. É possível fazer o Plot desta para verificar se a geometria foi bem inserida. O resultado é visível na Figura 55;

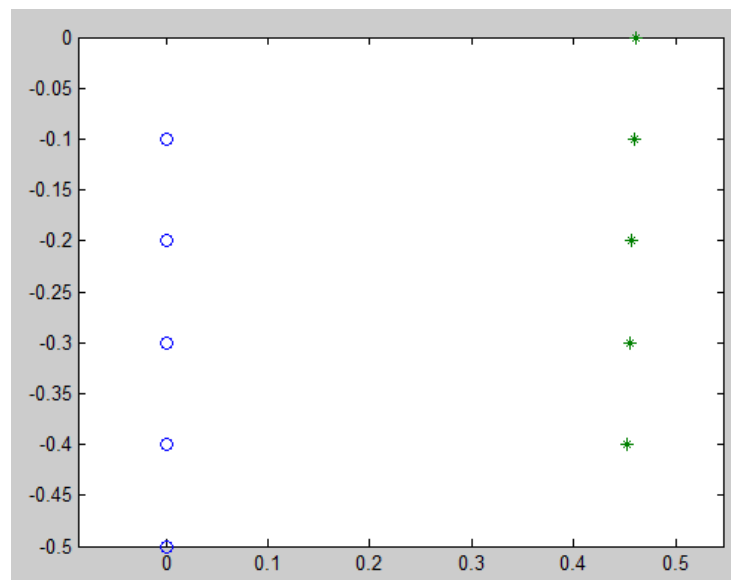


Figura 55 - Geometria do problema (Bolas azuis - geofones; asteriscos verdes – Tiros)

5. Inicia-se um ciclo que faz o load dos dados e prepara-os para serem representados graficamente:
 - 5.1. Abre o ficheiro selecionado previamente;
 - 5.2. Define que a primeira coluna dos dados é o vetor coluna dos tempos;
 - 5.3. Remove essa mesma coluna dos dados, obtendo-se uma tabela com apenas os valores das amplitudes medidas nos geofones;
 - 5.4. Cria uma matriz do mesmo tamanho que da matriz dos dados com os tempos repetidos coluna a coluna para facilitar os plots;
 - 5.5. Faz-se a normalização dos dados para o máximo;
 - 5.6. Representa-se graficamente cada tiro e obtém-se os tempos das chegadas das ondas P usando a função ginput (método de picking) (Figura 56);

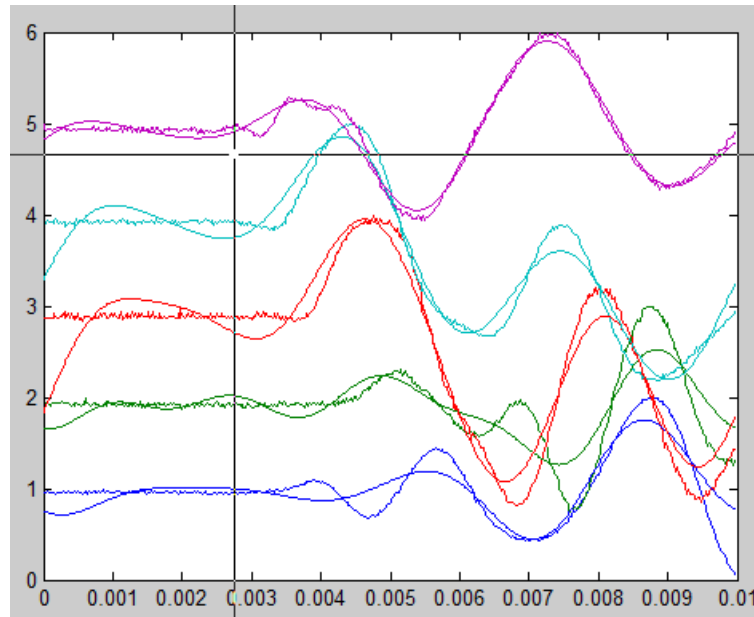


Figura 56 - Picking das primeiras chegadas

6. Cálculo das velocidades:

6.1. Insere-se manualmente a matriz das frações das distâncias dos raios entre tiro e geofone. Na Figura 57 representa-se o conceito por detrás da matriz. Apenas se representou para o tiro mais superficial, mas a ideia repete-se para todos os tiros.

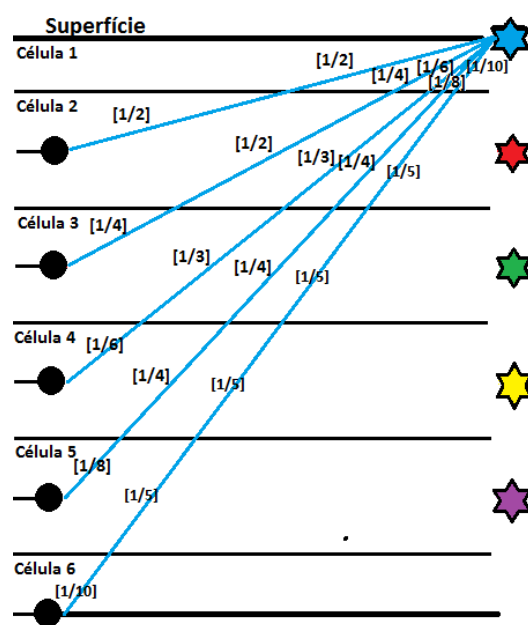


Figura 57 - Representação da matriz das frações das distâncias

6.2. Inicializa-se e constrói-se a matriz das distâncias por células;

6.3. Calcula-se a velocidade dividindo a matriz das distâncias pela matriz dos tempos “picados”.

5.9.2. Limitações do Programa

Este programa, em termos de aquisição, tem duas grandes limitações.

A primeira limitação está relacionada com o comportamento da propagação energética em meios heterogéneos. Neste programa é assumido que o caminho geométrico mais curto entre dois pontos, sendo estes o local onde se dá o tiro e o geofone recetor, ou seja, uma reta, é o caminho que a onda que representa a primeira chegada, toma. Num caso real isto pode não se verificar. Se existirem heterogeneidades no solo, que muito provavelmente existem, os raios têm tendência a serem curvos. Isto acontece devido à diferenciação que existe no solo não só em termos de humidade, mas como de consolidação. Sendo assim é possível que se obtenham velocidades maiores do que as reais se a onda tomar um caminho mais longo mas onde a velocidade de propagação seja maior.

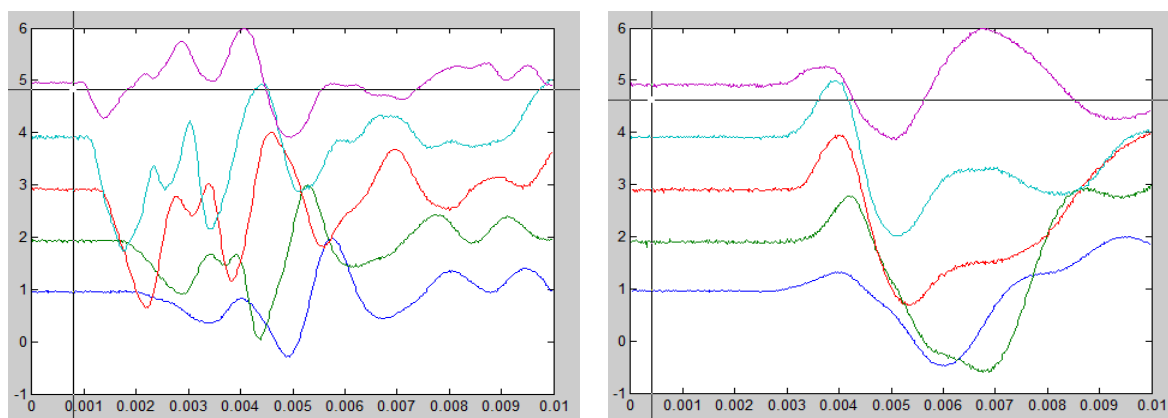


Figura 58 - Tiro 1, posição A (à esquerda); Tiro 24, posição A (à direita)

A segunda limitação está relacionada com o comportamento das próprias ondas em teor mais ou menos saturado. Observa-se que quando o solo se encontra mais seco o conteúdo em frequência é mais alto do que o mesmo para saturações maiores. Nas Figura 58 exemplifica-se esta situação.

No programa tenta-se fazer o *picking* da primeira chegada o mais rigorosamente possível pois estando a trabalhar com velocidades tão altas e distâncias tão curtas, ligeiros erros de *picking* levam a grandes erros no cálculo das velocidades. Olhando para as figuras pode-se verificar que numa situação mais tardia (Figura 59 à direita) onde o solo já se encontra húmido, relativamente a uma situação mais primária (Figura 59 à esquerda) onde ainda se trabalha em regime mais seco, as primeiras chegadas são bastante mais suaves tendo as ondas uma frequência menor o que dificulta a decisão de onde exatamente a chegada se dá.

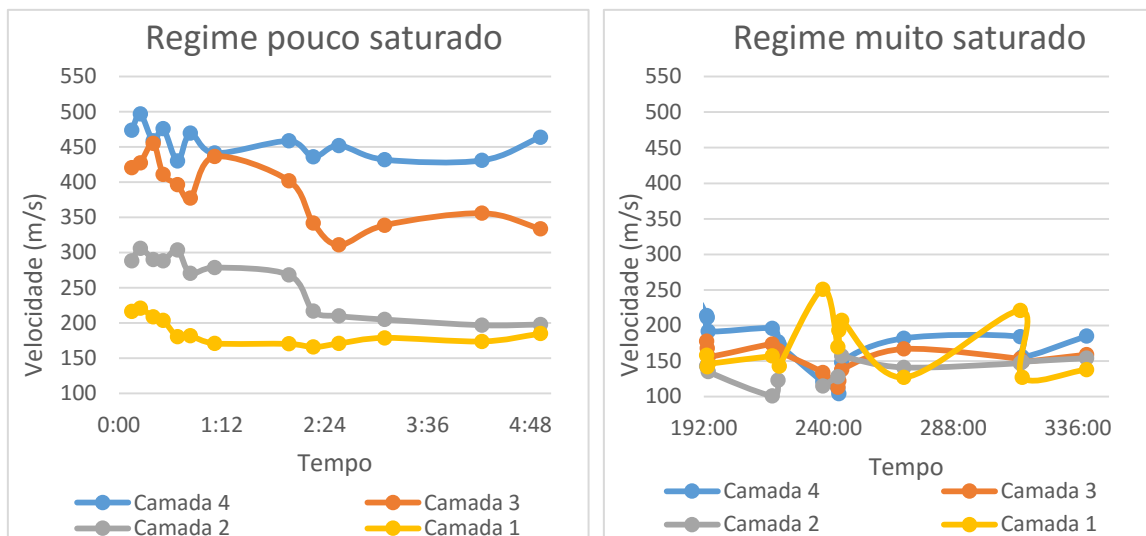


Figura 59 - Velocidades em regime pouco húmido (à esquerda); Velocidades em regime muito húmido (à direita)

Analisando os resultados obtidos em regime muito e pouco saturado (Figura 59), pode-se verificar que o erro aumenta drasticamente tornando, os dados em regime quase saturado, praticamente inúteis.

Olhando para o exemplo da camada 1 em que no primeiro gráfico é possível observar um comportamento de decréscimo de velocidades seguido duma estabilização ou a camada 4 onde não se não existe grande variação e tentar fazer a mesma interpretação no segundo gráfico verifica-se difícil.

5.10. Correlações em TANAGRA

O programa TANAGRA, neste trabalho, é utilizado para determinar se existe alguma correlação entre as variáveis estudadas. As variáveis são o tempo, as resistividades, as variações de resistividades, as velocidades e a variação medida no defletómetro.

Para alcançar esse objetivo optou-se por fazer uma análise de fatores principais. A análise de fator principal não iterativa é uma abordagem que tenta detetar estruturas subjacentes nas relações entre variáveis de interesse. Ao contrário da análise de componente principal, esta é focada apenas na variância partilhada entre os vários grupos de variáveis. Deve ser utilizada quando o objetivo é descobrir uma estrutura latente nas variáveis. Funciona usando uma versão ligeiramente modificada da matriz de correlação onde a diagonal, a anterior estimativa comutativa de cada variável, é substituída pela sua correlação quadrada múltipla com todas as outras. O utilizador pode simplesmente especificar o número desejado de fatores (Rakotomalala, 2005).

O programa permite criar digramas utilizando funções nativas ao mesmo, num processo semelhante ao LabView. O diagrama utilizado é muito simples. Primeiro define-se quais as variáveis a utilizar dum ficheiro previamente preparado. Depois disso apenas se faz a análise de fator principal que nos dá os valores de correlação. Depois é possível obter um diagrama de dispersão dos valores obtidos onde se escolhe quais os eixos representar.

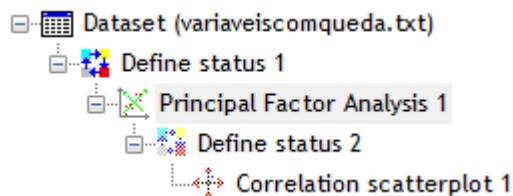


Figura 60 - Diagrama usado em TANAGRA

Quando se faz a análise de fatores principais o programa apresenta os resultados como se pode ver nas Figuras 61 e 62.

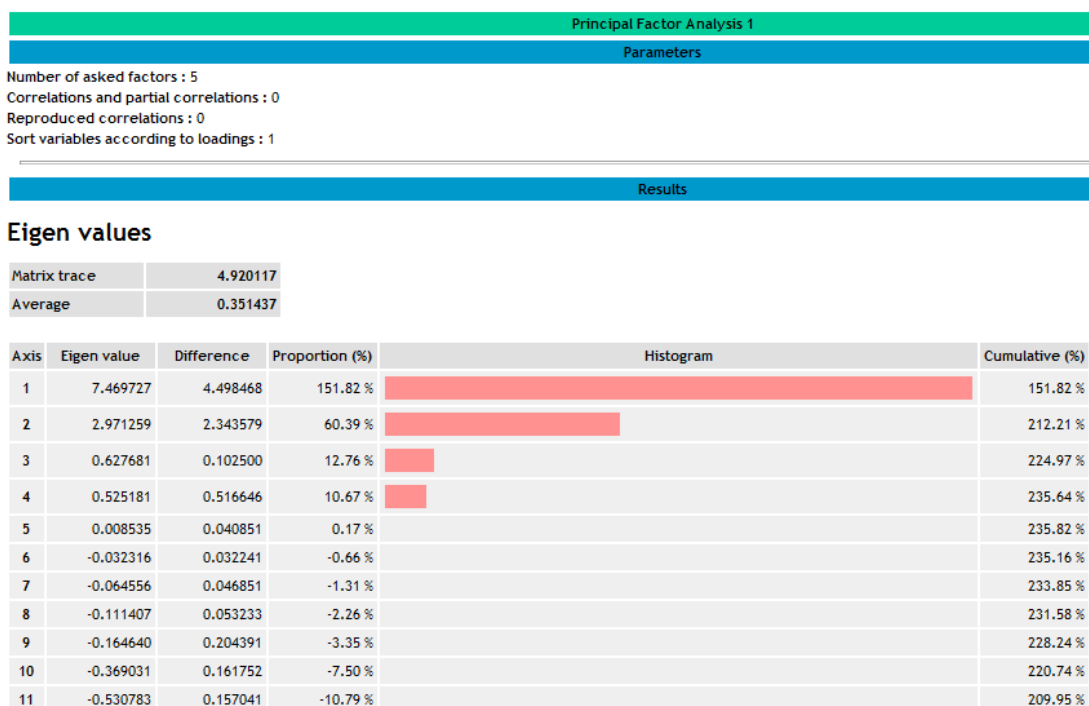


Figura 61 - Eigen Values - TANAGRA

Factor Loadings [Communality Estimates]

Attribute	Communality Estimates		Axis_1		Axis_2		Axis_3		Axis_4		Axis_5	
	Prior	Final	Corr.	Sq. (Cumul.)	Corr.	Sq. (Cumul.)	Corr.	Sq. (Cumul.)	Corr.	Sq. (Cumul.)	Corr.	Sq. (Cumul.)
-												
vp1	0.87393	0.98351	0.94140	0.89 (0.89)	0.11047	0.01 (0.90)	-0.27938	0.08 (0.98)	-0.08372	0.01 (0.98)	-0.00162	0.00 (0.98)
Tempo	0.36710	0.84889	-0.89984	0.81 (0.81)	-0.18512	0.03 (0.84)	-0.06904	0.00 (0.85)	-0.01118	0.00 (0.85)	-0.00492	0.00 (0.85)
Ro1	0.94706	1.02832	0.87735	0.77 (0.77)	-0.39791	0.16 (0.93)	-0.26627	0.07 (1.00)	-0.17020	0.03 (1.03)	0.01928	0.00 (1.03)
Ro3	0.82650	0.97199	-0.85850	0.74 (0.74)	-0.45463	0.21 (0.94)	-0.00318	0.00 (0.94)	-0.16781	0.03 (0.97)	0.01003	0.00 (0.97)
deslocamento	-0.95204	0.64278	0.78985	0.62 (0.62)	-0.13380	0.02 (0.64)	-0.03162	0.00 (0.64)	-0.00321	0.00 (0.64)	-0.00118	0.00 (0.64)
Ro2	0.92256	0.96314	0.77161	0.60 (0.60)	0.48158	0.23 (0.83)	0.31294	0.10 (0.93)	0.18582	0.03 (0.96)	0.05814	0.00 (0.96)
vp2	0.83932	0.88650	0.72545	0.53 (0.53)	0.49328	0.24 (0.77)	0.25444	0.06 (0.83)	-0.22835	0.05 (0.89)	0.00180	0.00 (0.89)
DRo1	0.71272	1.02229	-0.72018	0.52 (0.52)	0.67763	0.46 (0.98)	-0.16892	0.03 (1.01)	-0.12461	0.02 (1.02)	0.01995	0.00 (1.02)
DRo4	0.53139	0.92807	-0.66509	0.44 (0.44)	0.67526	0.46 (0.90)	-0.11781	0.01 (0.91)	-0.12548	0.02 (0.93)	0.01113	0.00 (0.93)
vp4	0.60453	0.65752	0.65857	0.43 (0.43)	0.12755	0.02 (0.45)	-0.45401	0.21 (0.66)	-0.03229	0.00 (0.66)	0.01924	0.00 (0.66)
DRo3	0.19149	0.80366	-0.62835	0.39 (0.39)	0.62625	0.39 (0.79)	-0.09941	0.01 (0.80)	-0.08203	0.01 (0.80)	0.00578	0.00 (0.80)
vp3	0.65297	0.68506	0.59589	0.36 (0.36)	0.30561	0.09 (0.45)	0.17941	0.03 (0.48)	-0.45054	0.20 (0.68)	-0.03745	0.00 (0.69)
Ro4	0.78322	0.82972	-0.43220	0.19 (0.19)	-0.70051	0.49 (0.68)	0.13388	0.02 (0.70)	-0.36326	0.13 (0.83)	0.04817	0.00 (0.83)
DRo2	-2.38063	0.35094	-0.43597	0.19 (0.19)	0.39861	0.16 (0.35)	-0.04170	0.00 (0.35)	-0.01564	0.00 (0.35)	0.00132	0.00 (0.35)
Var. Expl.	4.92012	11.60238	7.46973	152 % (152 %)	2.97126	60 % (212 %)	0.62768	13 % (225 %)	0.52518	11 % (236 %)	0.00854	0 % (236 %)

Figura 62 - Factor Loadings – TANAGRA

Com estes dados, principalmente da Figura 62, é possível identificar quais valores correlacionam uns com os outros e quais apresentam comportamento independente. Por exemplo, é natural que a velocidade de propagação das ondas P no solo, à medida que se aumenta o teor em água, diminua com o tempo. De facto, no eixo 1 (*Axis_1*), repara-se que tanto “vp1” como “Tempo” têm valores de correlação altos, no entanto um é positivo e outro negativo. Isto é indicativo que à medida que um sobe (o tempo cresce) o outro desce (a velocidade diminui) portanto nota-se uma relação inversamente proporcional. Estes valores podem então ser projetados num diagrama circular. No caso deste trabalho usam-se apenas 2 eixos.

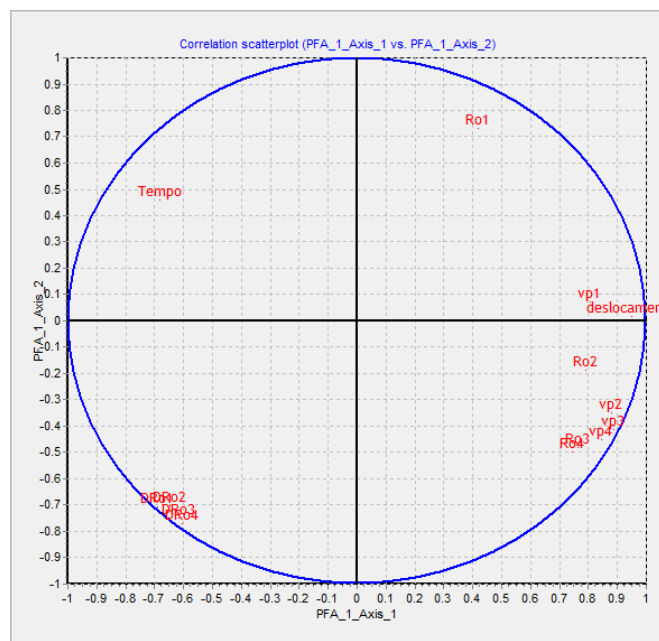


Figura 63 – Diagrama de dispersão em TANAGRA

Na interpretação dos dados apresentam-se estes diagramas, então é necessário compreender como se interpretam e donde originam.

6. bDados e Resultados

As medições efetuadas foram feitas em diferentes situações, neste capítulo explicam-se essas situações e apresentam-se os resultados que se obtiveram na forma de tabelas. A interpretação desses valores é feita no capítulo seguinte onde se apresentam gráficos e explicações plausíveis para os comportamentos observados.

Os valores obtidos na aquisição usando métodos elétricos, neste capítulo, são dados em resistividades (Ωm) embora sejam medidos em resistências (Ω). A passagem de resistências a resistividades é feita usando a seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{2\pi R}{\frac{1}{M-A} - \frac{1}{B-M} - \frac{1}{N-A} + \frac{1}{B-N}} \quad 34$$

Em que ρ : resistividade (Ωm); R : resistência medida (Ω); M, N : posição dos elétrodos de potencial (m); A, B : posição dos elétrodos de corrente (m). A geometria dos elétrodos varia nos seguintes valores:

Tabela 7 - Geometria variável dos elétrodos em metros

Camada	A (m)	B (m)	M (m)	N (m)
1	0	0,66	0,16	0,26
2	0	0,66	0,26	0,36
3	0	0,66	0,36	0,46
4	0	0,66	0,46	0,56

Os valores medidos de resistência podem ser consultados em anexo.

Os valores obtidos na aquisição sísmica são dados em m/s.

Os valores de deslocamento obtidos no defletómetro são dados em mm.

Todos os tempos apresentados neste trabalho são referente a um mesmo tempo inicial à exceção dos primeiros valores de secagem em que se apresentam em dias passados.

Camada 1 refere-se à camada mais profunda e Camada 4 à mais superficial de acordo com a sequência de montagem.

6.1. Montagem

À medida que se foram colocando as camadas de solo no tanque foram sendo feitas medições de resistividade. Pretende-se demonstrar a diferença de humidade inicial entre camadas.

Tabela 8 - Resistividades (Ωm) - Montagem

Ensaio	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
1	350,49			
2	373,55	239,18		
3	436,71	374,46	205,18	
4	471,70	443,39	233,56	130,95

6.2. Primeira secagem

Após a montagem o maciço de solo foi deixado a secar durante um mês e, periodicamente, foram feitas medições de resistividade que permitem estudar o comportamento dessa secagem.

Tabela 9 - Resistividades (Ωm) – Primeira Secagem

Ensaio	Dias	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
5	0	452,22	402,75	229,96	152,41
6	1	443,57	397,80	228,02	151,71
7	2	437,08	388,22	229,68	158,12
8	3	432,75	383,26	234,39	164,19
9	14	441,40	404,74	270,09	201,15
10	31	392,29	392,51	294,44	232,17
11	35	385,36	395,82	303,57	237,88

6.3. Primeiro humedecimento

Depois dum mês onde se permitiu ao solo baixar o seu teor em água foram colocados aproximadamente 60l de água no lado vazio do tanque. O nível freático ficou onde se encontram o primeiro geofone e elétrodo de potencial. Houve absorção desta água, pelo solo, por capilaridade. Ao longo de 190h foram sendo feitas medições, mais frequentes no início do ensaio, a par, de resistividade elétrica e de sísmica. Começou-se também a medir o assentamento no tempo com o defletómetro. A partir do início deste ensaio todos os tempos são relativos ao início do mesmo.

6.3.1. Elétrica

O primeiro valor é exatamente antes de se colocar água no tanque e será a referência inicial. Os valores de resistividade são dados em Ωm .

Tabela 10 - Resistividades (Ωm) - Primeiro Humedecimento

Ensaio	Tempo	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
12	0:00:00	381,90	404,41	321,28	260,04
13	0:03:00	202,53	298,35	288,35	250,71
14	0:13:00	169,42	292,73	287,52	249,55
15	0:18:00	144,75	290,75	285,86	248,38
16	0:26:00	100,61	292,07	286,97	248,38
17	0:33:00	80,06	296,37	288,07	249,55
18	0:43:00	54,53	302,97	290,01	249,55
19	0:54:00	39,21	304,30	289,46	248,38
20	1:10:00	43,92	260,35	296,38	251,88
21	1:54:00	54,31	177,75	297,76	250,71
22	2:13:00	57,99	149,01	301,08	251,88
23	2:35:00	61,67	124,56	306,34	254,21
24	3:06:00	68,37	68,72	318,79	257,71
25	3:35:00	71,40	41,07	323,77	258,87
26	4:02:00	74,22	33,77	308,27	261,21
27	4:33:00	77,03	34,39	288,90	262,37
28	4:51:00	77,89	34,53	277,28	261,21
29	26:46:00	91,31	55,67	54,32	209,78
30	27:24:00	91,09	56,99	55,10	206,40
31	28:10:00	90,88	57,82	54,96	202,79
32	29:10:00	91,09	58,45	55,07	196,84
33	30:16:00	91,31	59,54	54,96	191,12
34	50:50:00	91,09	66,41	53,60	118,01
35	52:32:00	91,31	67,40	54,02	116,49
36	53:59:00	91,31	68,06	55,29	114,16

37	74:08:00	92,39	73,68	56,73	96,32
38	77:35:00	91,96	74,67	57,84	93,87
39	170:07:00	87,85	82,27	60,33	62,50
40	190:12:00	86,77	83,26	61,71	60,17

6.3.2. Sísmica

Os valores são apresentados em m/s.

Tabela 11 – Velocidades (m/s) - Primeiro Humedecimento

Ensaio	Tempo	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
1	0:09:00	216	289	421	474
2	0:15:00	221	306	427	497
3	0:24:00	209	290	455	459
4	0:31:00	204	288	411	476
5	0:41:00	181	304	397	430
6	0:50:00	182	271	377	470
7	1:07:00	171	279	436	441
8	1:59:00	171	268	402	459
9	2:16:00	166	217	342	436
10	2:34:00	171	210	311	452
11	3:06:00	179	205	339	432
12	4:14:00	174	197	356	431
13	4:55:00	185	198	334	464
14	26:54:00	158	158	236	369
15	28:15:00	181	149	248	363
16	28:49:00	186	155	252	361
17	30:24:00	175	173	251	366
18	50:59:00	173	161	238	338
19	52:37:00	162	146	224	350
20	53:53:00	162	158	222	331
21	74:05:00	173	149	214	310
23	170:16:00	159	140	185	234

24	190:27:00	162	148	178	234
----	-----------	-----	-----	-----	-----

6.3.3. Defletómetro

Os valores aqui apresentados são retirados do defletómetro. Ao longo do tempo foi-se medindo a variação da altura da coluna de água no lado vazio do tanque e esses valores são apresentados na coluna “h água”. Fez-se isto para ter um conhecimento de quanta água aproximadamente foi absorvida pelo solo mas não se teve em consideração evaporação.

Tabela 12– Deslocamento – Primeiro Humedecimento

Tempo	Valor (mm)	h água (cm)
0:05:00	0	0
0:11:00	0,12	2
0:13:00	0,16	2,5
0:21:00	0,21	3
0:26:00	0,24	3,5
0:29:00	0,25	3,5
0:36:00	0,35	4
0:38:00	0,38	4
0:43:00	0,4	4,1
0:48:00	0,4	4,1
0:54:00	0,43	4,3
1:02:00	0,43	4,4
1:11:00	0,49	4,5
1:56:00	0,48	4,8
2:17:00	0,51	5
2:37:00	0,54	5,2
3:08:00	0,64	6,2
4:34:00	0,62	6,2
4:53:00	0,63	6,3
4:59:00	0,68	6,5
26:50:00	0,68	7,2
26:58:00	0,72	7,2

28:18:00	0,73	7,3
30:27:00	0,74	7,3
51:01:00	0,74	7,5
52:34:00	0,74	7,5
74:10:00	0,72	7,6
77:35:00	0,72	7,6
170:20:00	0,51	7,9
190:32:00	0,51	10

6.4. Sequência de humedecimentos e estabilizações

Depois do ensaio anterior em que se colocou água e ensaiou-se durante 190h, foram feitos ensaios semelhantes, mais curtos, para comprovar os resultados obtidos anteriormente.

Nesta sequência não foram feitas medições usando o defletómetro.

A primeira coluna das tabelas “Ação” representa o que se fez naquele período de tempo. Começou por se colocar mais 150l de água no lado vazio do tanque e esperou-se duas horas para que houvesse alguma absorção. Passado esse tempo voltou-se a colocar água, mas, desta vez, 105l. Passadas 7h colocou-se 180l numa tentativa de saturar todas as camadas do solo. Passadas 23 horas, quando o solo na camada mais superficial já aparentava estar mais saturado, retirou-se toda a água que ainda não tinha sido absorvida no lado vazio do tanque. Fez-se isto para tentar observar o comportamento de drenagem.

6.4.1. Elétrica

Os valores de resistividade são dados em Ωm .

Tabela 13 - Resistividades (Ωm) – Segundo e posteriores humedecimentos.

Ação	Ensaio	Tempo	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
Pós 150l	41	191:00:00	84,60	82,27	61,99	59,94
	42	191:18:00	83,95	69,71	60,88	59,12
	43	191:39:00	84,82	66,05	58,39	59,82
	44	192:54:00	84,39	69,38	48,18	58,07
Pós 105l	45	193:17:00	82,66	69,71	45,66	55,74
	46	193:28:00	81,57	70,70	40,13	53,06
	47	193:42:00	81,36	71,70	40,82	44,20

	48	218:00:00	77,25	71,70	44,66	17,78
	49	220:30:00	77,25	71,70	44,47	17,71
Pós 180l	50	221:00:00	75,73	71,04	44,25	16,86
	51	221:10:00	75,51	70,70	43,70	15,80
	52	221:46:00	75,51	70,37	43,17	15,07
	53	237:53:00	75,51	69,38	42,45	14,21
	54	242:19:00	75,51	69,05	42,28	14,20
	55	242:48:00	75,08	69,05	42,17	14,38
	56	243:00:00	74,43	68,39	41,73	14,28
	57	243:11:00	74,00	68,06	41,54	14,20
	58	243:22:00	74,00	68,00	40,84	14,04
	59	244:02:00	73,57	67,73	40,79	13,86
Descarga	60	244:26:00	74,00	68,39	41,32	14,17
	61	244:34:00	75,08	68,72	41,45	14,41
	62	244:46:00	75,95	69,05	41,43	14,70
	63	245:03:00	77,46	69,05	40,35	14,83
	64	269:23:00	82,66	56,40	35,09	23,91
	65	293:32:00	83,30	55,87	36,25	24,84
	66	313:28:00	84,39	56,60	37,75	25,65

6.4.2. Sísmica

Os valores são apresentados em m/s.

Tabela 14 - Velocidades (m/s) – Segundo e posteriores humedecimentos.

Ação	Ensaio	Tempo	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
Pós 150l	1	191:02:00	163	140	174	230
	2	193:08:00	158	143	178	214
Pós 105l	3	193:21:00	142	144	168	211
	4	193:48:00	146	135	156	192
	5	218:27:00	157	101	174	196
	6	220:35:00		123	165	177
Pós 180l	7	221:05:00	143		163	173
	8	235:05:00	251	115	134	121
	10	243:39:00	170	128	113	112
	11	244:01:00	193		122	104
Descarga	12	245:07:00	207	157	138	148
	13	269:00:00	127	141	167	182
	15	313:55:00	221	147	153	184

	16	314:38:00	127	149	149	156
--	----	-----------	-----	-----	-----	-----

6.5. Ensaio edométrico

De modo a estudar o comportamento da resistividade aquando a compactação do solo em que esta é medida, efetuou-se um teste de carga no edómetro. No entanto não se trata dum ensaio normal pois utilizou-se uma cápsula concebida de modo a ser possível medir a resistividade do solo à medida que este é compactado ou humidificado.

Os dados iniciais são obtidos em resistências, mas para manter coerência são apresentados em resistividades. Os valores originais em resistência são apresentados em anexo. Para transformar os valores utiliza-se a segunda lei de Ohm. O diâmetro da cápsula é 0,101m e a distância entre os elétrodos de potencial é 0,028m. Assim:

$$\rho = R * \frac{\pi * \left(\frac{0.101}{2}\right)^2}{0.028} \cong \rho = 0,28599R \quad 34$$

Com ρ – resistividade (Ωm); R – resistência (Ω).

Juntamente com o valor de resistividade medido para cada momento, apresenta-se também a carga aplicada e o assentamento observado. O ensaio pode ser dividido em duas partes, uma a seco e outra com água.

Tabela 15 – Edómetro – Carga (kPa), assentamento (mm) e resistividades (Ωm)

Estado	Carga (kPa)	Assentamento (mm)	Resistividade (Ωm)
Seco	0	0	961,42
	12,5	0,013	935,67
	75	0,3	1081,60
		0,3	1041,54
	137	0,597	1204,64
		0,601	1170,30
	Húmido	200	0,81
3,98			841,24
3,98			612,33
4,068			491,01
4,193			348,52
4,295			265,54
4,416			179,12

		4,556	82,70
		4,839	80,69
		4,93	78,97
		5,099	73,54
		5,238	68,39
		5,3	67,81
		5,314	68,10
	325	5,849	70,39
		5,897	70,39
		5,923	70,39
		5,941	70,39
	575	6,884	74,11
		7,038	75,25
		7,06	75,25
		7,108	75,25
	825	7,77	78,12
		7,936	78,69

7. Interpretação dos Resultados

Neste capítulo faz-se a interpretação dos resultados obtidos no capítulo anterior. Pretende-se, aqui, representar graficamente, estudar o comportamento da resistividade, velocidade de ondas P e assentamento ao longo do tempo.

Deve ser referido que as velocidades são obtidas utilizando o método de *picking* no MatLab através do script descrito cujas limitações admitem erros na ordem dos 5 a 10%.

7.1. Montagem

Como já referido no capítulo anterior, existem apenas dados de resistividade neste período. Como também já referido, quando as camadas de solo foram colocadas no tanque encontravam-se com níveis diferentes de humidade. Estando a resistividade intrinsecamente relacionada com o teor em água podemos então entender essas diferenças iniciais.

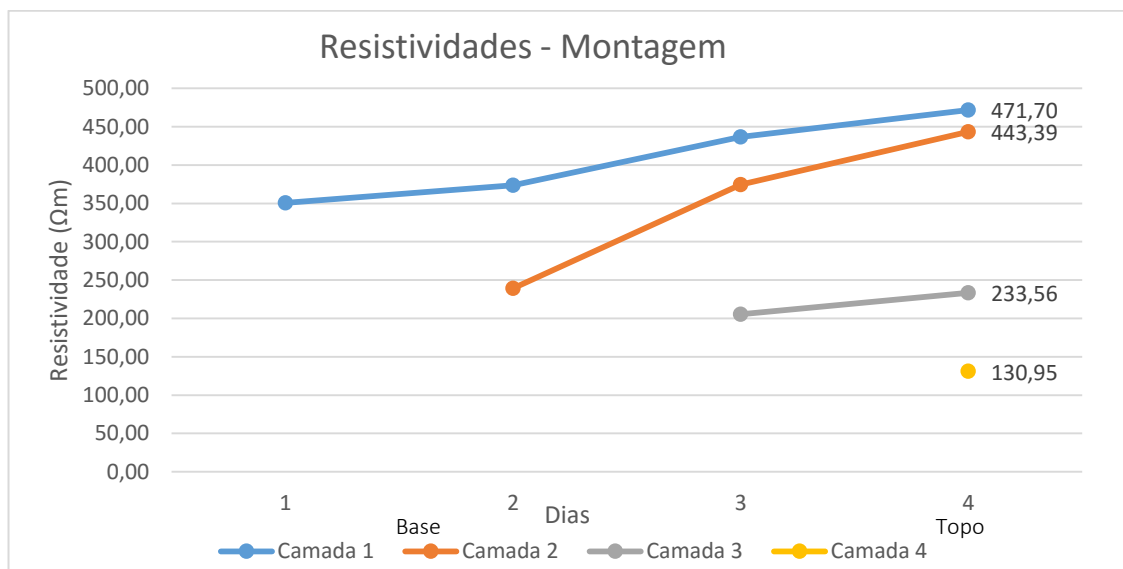


Figura 64 - Resistividades - Montagem

Observa-se que a partir do momento em que uma camada é colocada a sua resistividade aumenta com o tempo. É importante notar que entre a deposição das camadas esperou-se 1-2 dias. A camada inferior, quando foi colocada, já tinha menos humidade do que as outras na mesma situação. Isto acontece porque o solo foi retirado dum recipiente onde o solo foi deixado a secar durante algum tempo. Portanto, as camadas inferiores no tanque correspondem às camadas que foram retiradas do topo do recipiente inicial, e são aquelas que secaram mais rápido nesse meio. À medida que o solo nesse recipiente ia sendo utilizado alcançavam-se zonas cada vez mais profundas e, por consequência, mais húmidas. Exatamente por isso, a camada mais superficial no

tanque (que era o solo no fundo do recipiente) tem muito mais água quando é depositada do que a camada 1 (Menor resistividade elétrica). Como seria de esperar, à medida que o tempo passa, a água evapora em todas as camadas e as resistividades aumentam.

Outra hipótese para explicar o comportamento crescente dos valores da resistividade ao longo do processo de compactação por camadas será considerar que o índice de vazios vai diminuindo implicando um aumento da resistividade.

É expectável que os dois processos possam ocorrer concomitantemente.

7.2. Secagem

Tal como referido no capítulo anterior, o solo foi deixado a secar durante pouco mais dum mês o que permite estudar a variação do grau de saturação usando os dados de resistividade elétrica. Neste período são também apenas esses os dados disponíveis.

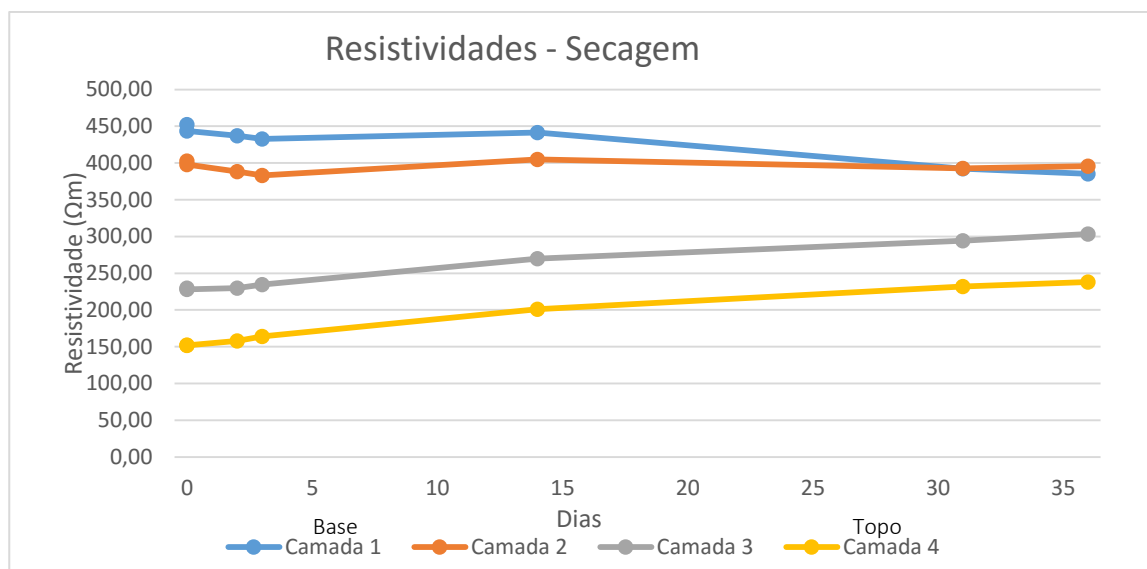


Figura 65 - Resistividades – Secagem

Tal como na montagem observa-se um aumento contínuo de resistividade nas camadas 3 e 4. Isto acontece devido a serem as camadas mais húmidas e mais próximas da superfície. Tendo mais facilidade em transmitir a humidade para o ar por evaporação são as que sofrem um maior aumento de resistividade. As camadas 1 e 2 continuam a ser as camadas mais resistentes (menor humidade), no entanto esse valor decresce consideravelmente na camada 1 e mantém-se relativamente estável na camada 2 ao longo do mês. A humidade muito superior das camadas suprajacentes (3 e 4) não só tem tendência a evaporar pela superfície do solo mas também a infiltrar-se por difusão nas camadas mais secas numa procura de homogeneidade. Assim, a camada 1, sendo a mais seca inicialmente é aquela que tem um maior declínio na resistividade e a

camada 2 não tem a oportunidade de subir ou baixar o seu conteúdo em água consideravelmente. Supõe-se que na situação hipotética de o solo ter tido oportunidade de secar indefinidamente, eventualmente as camadas 4 e 3 seriam mais resistentes que as subjacentes tendo mais facilidade de evaporação seguidas da camada 2 e finalmente a 1. Eventualmente os valores tenderiam para um valor semelhante quando todo o solo estivesse seco por igual, valor esse alcançado primeiro pela camada 4, seguida da 3, 2 e finalmente a 1. Isto assumindo porosidades semelhantes que provavelmente não será o caso.

7.3. Primeiro humedecimento

7.3.1. Resistividade

As medições feitas neste ensaio foram ao longo de 190 horas. As grandes variações são visíveis nas primeiras horas, portanto num gráfico em que as 190h estão representadas numa escala linear não é possível analisar o comportamento do solo.

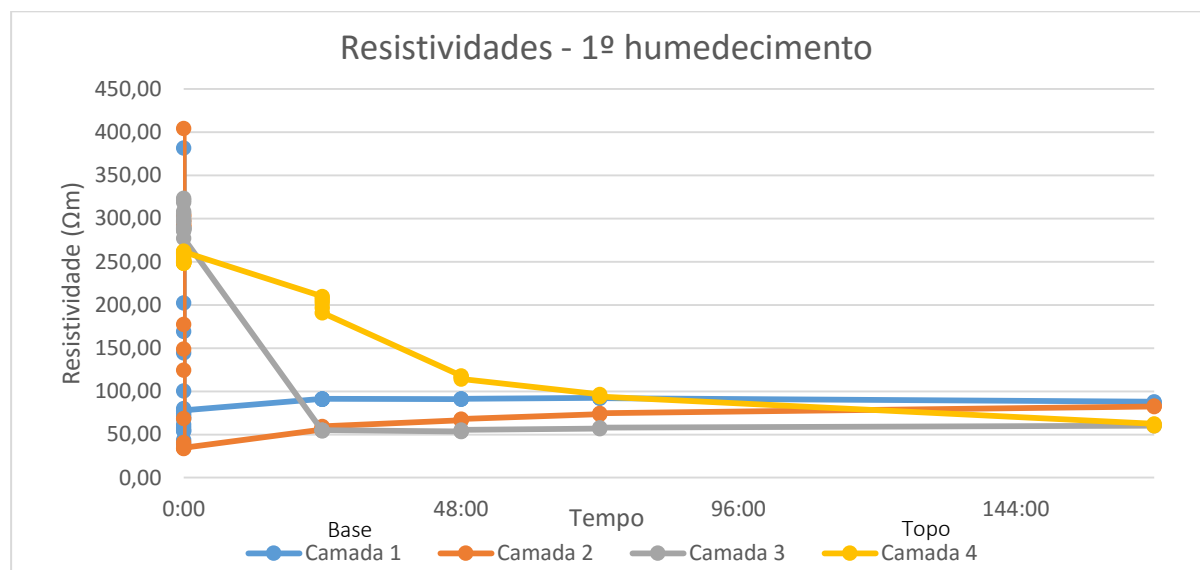


Figura 66 - Resistividades - Primeiro humedecimento (190h)

Optou-se por representar os dados em duas figuras diferentes. A primeira com os dados das primeiras cinco horas do ensaio (Figura 67) e a segunda com todos os outros (incluindo o último valor da primeira) (Figura 68).

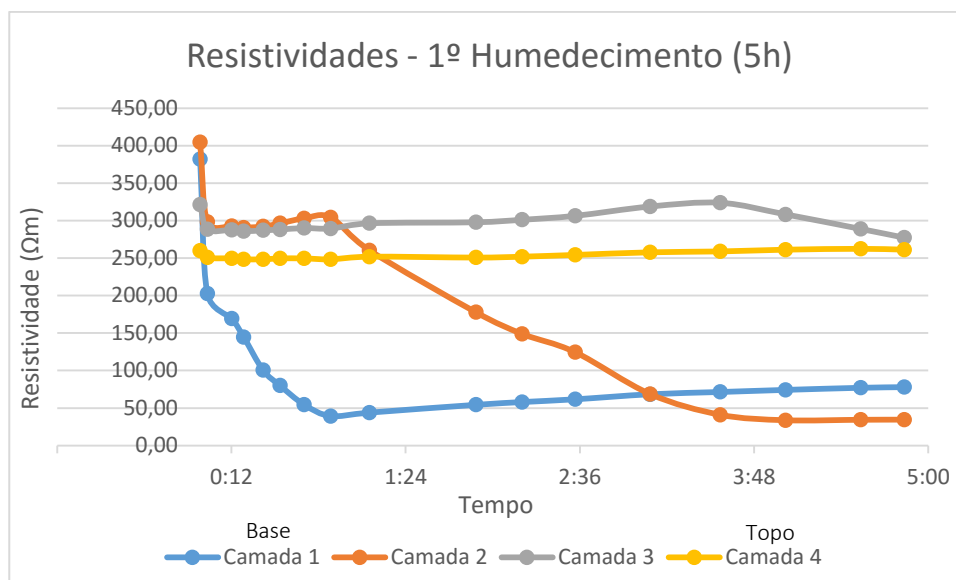


Figura 67 - Resistividades - Primeiro humedecimento (Primeiras 5h)

Imediatamente após a inserção de água no sistema, a resistividade da camada 1 decresce imenso para níveis muito abaixo dos das outras camadas. Desce continuamente até cerca de uma hora onde se pensa que os poros estão suficientemente cheios de água para conduzir o máximo de corrente, sendo o mínimo resistivo. Depois deste ponto mínimo ($\sim 40 \Omega m$) seria de esperar que o valor ou se mantivesse estável ou continuasse a diminuir lentamente enquanto o ar que ainda resta nos poros vai sendo lentamente expelido (ou comprimido) e estes preenchidos com mais água, no entanto, a resistividade começa lentamente, mas continuamente a aumentar. Pensa-se que este aumento é devido à compactação do solo e a razão grãos/poros (ou resistência/conductor dado que nos poros com água é onde passa a corrente) estar a diminuir. Deste modo seria de esperar que o solo estivesse a sofrer consolidação como se pode provar com os valores de deslocamento medidos no defletómetro.

A resistividade da segunda camada também decresce um pouco no início do ensaio, mas mantém-se estável durante algum tempo. Estranhamente começa a subir em vez de descer, como aconteceu na camada 1. Sobe até que atinge um máximo e desce com relativa rapidez. Pensa-se que esta subida está relacionada com a passagem do ar que é expelido da camada 1, a mais profunda. O ar é isolante e pode conferir alguma resistividade ao solo por onde passa (ou onde fica aprisionado sob pressão). Não sendo a variação muito grande, é uma hipótese. Após cerca duma hora inicia a descida brusca de resistividade na segunda camada. Tal acontece, pois finalmente a água, por capilaridade, chegou a esse intervalo e o processo que se vê na primeira camada repete-se. O mínimo é um valor muito semelhante ao valor mínimo atingido na primeira camada, como seria de esperar tratando-se do mesmo solo. Novamente observa-se a

resistividade a ter uma subida lenta (mais lenta que na camada 1) devido à consolidação do solo colapsável nessa camada.

O processo de subidas e descidas de resistividade provocado pelo deslocamento do ar, movimento de água por capilaridade e consolidação repete-se para as camadas 3 e 4 em tempos sucessivos à medida que se atinge camadas mais superficiais.

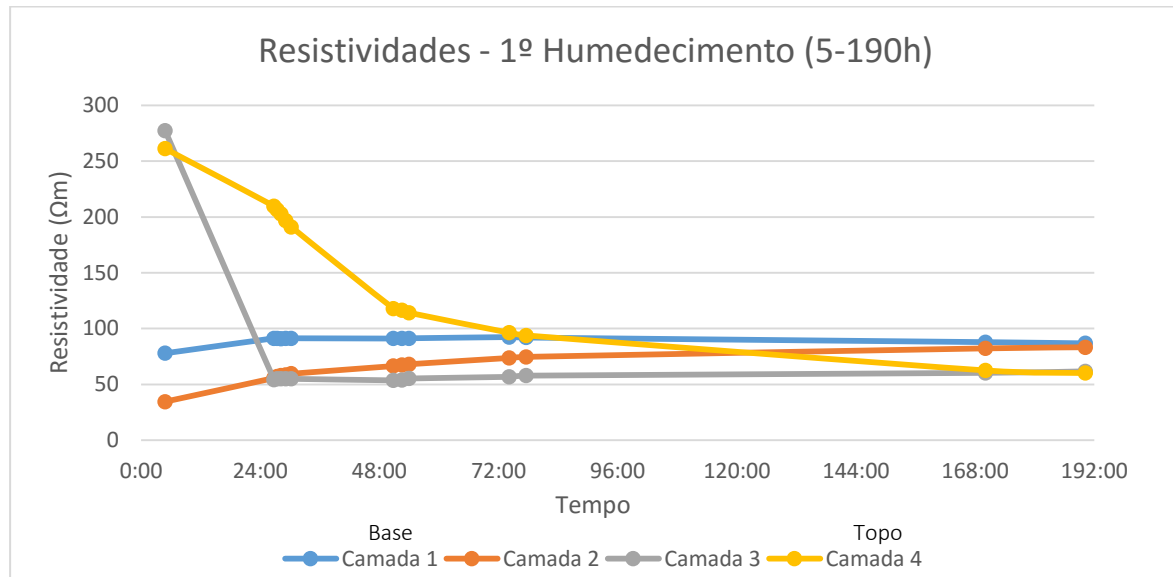


Figura 68 - Resistividades - Primeiro humedecimento (5-190h)

Observa-se também que quanto mais profunda uma camada, maior a subida de resistividade devido a consolidação em vários estágios que é concordante com o facto que camadas mais profundas têm mais material suprajacente o que implica maior confinamento. Logo no final as camadas mais profundas deverão ter uma porosidade inferior às camadas superiores e, por isso quando o solo se encontrar totalmente húmido voltar-se-á a esta questão.

7.3.2. Velocidades

Tal como no caso da resistividade, grandes variações nas velocidades são observadas nas primeiras cinco horas. Por isso apresentam-se novamente os 3 gráficos.

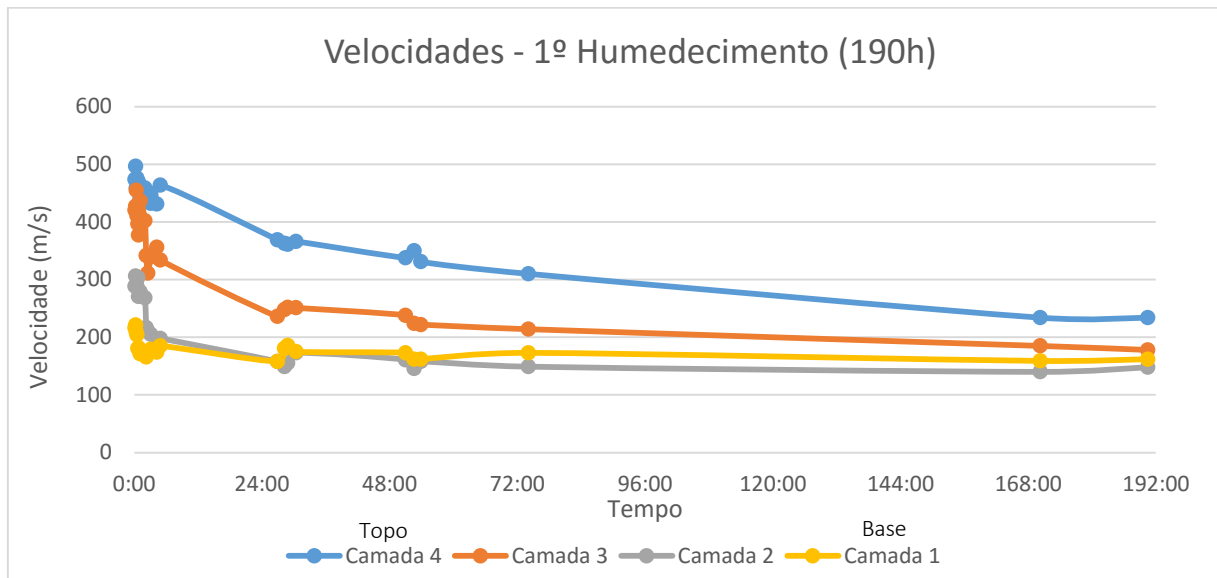


Figura 69 - Velocidades - Primeiro Humedecimento (190 horas)

É importante notar que as velocidades iniciais não são todas iguais nas diferentes camadas. Na realidade as camadas têm velocidades menores quanto mais profundas.

A seguir apresentam-se os dois gráficos com os dados repartidos.

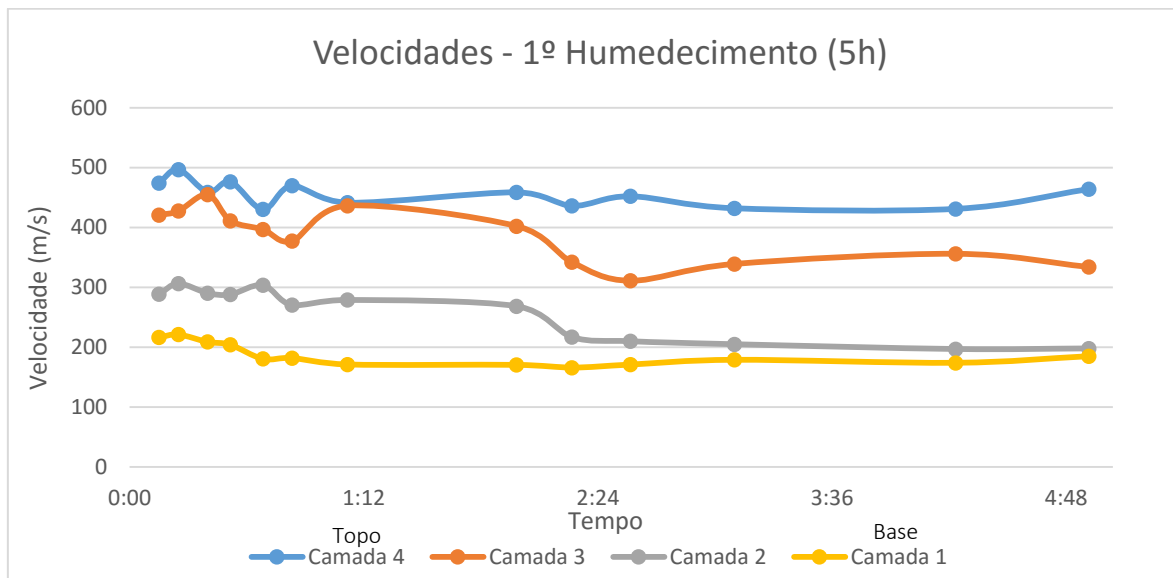


Figura 70 - Velocidades - Primeiro humedecimento (Primeiras 5h)

Relembra-se que o erro de medição das velocidades é elevado então torna-se difícil fazer uma interpretação rigorosa, mas ainda assim é possível tirar conclusões. Os dados nas camadas superiores (3-4) são algo erráticos.

É claro que na camada 1, a mais profunda (a amarelo), na primeira meia-hora existe uma descida de velocidades concordante com a queda de resistividades. Isto acontece porque é esta camada que humidifica primeiro e um solo húmido implica menores velocidades. Tal como na resistividade observa-se que as quedas de velocidades são sequenciais, como seria de esperar. Pode-se considerar estável a velocidade na camada 2 até às 2h e na camada 3 até um pouco depois disso. A queda na camada 4 apenas se observa no segundo gráfico, juntamente com a contínua queda da velocidade na camada 3.

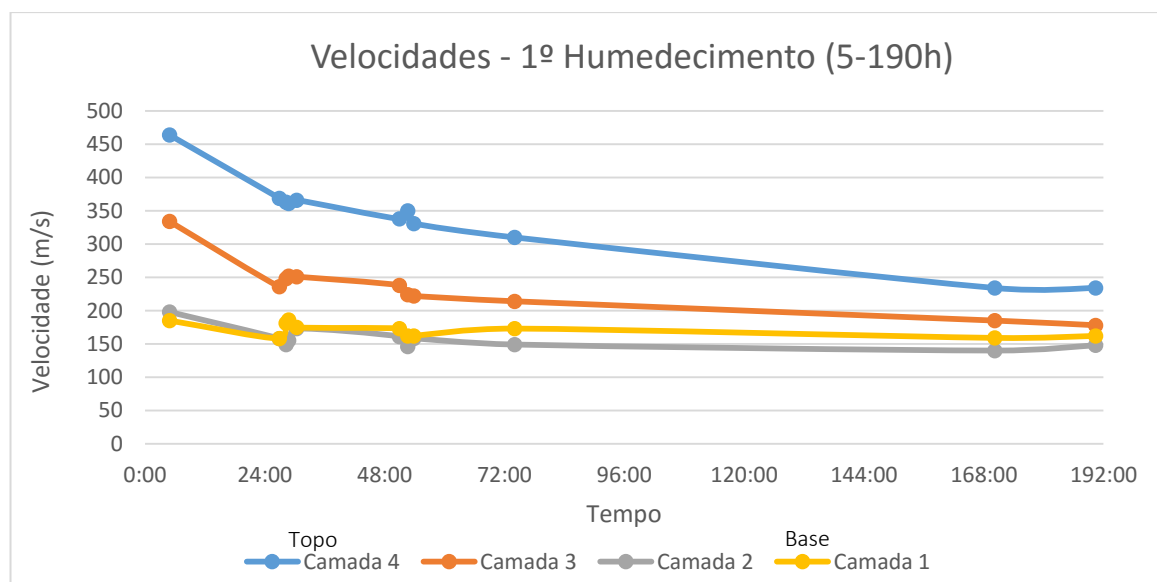


Figura 71 - Velocidades - Primeiro humedecimento (5-190h)

Presume-se que eventualmente todas as velocidades tendam para um mesmo valor, tratando-se do mesmo solo. A natureza deste gráfico parece sugerir o mesmo. Assumindo porosidades iguais, o que como já referido, provavelmente não se verifica.

7.3.3. Defletómetro e absorção da água

Neste ponto interpreta-se os valores retirados do defletómetro colocado na superfície do solo para determinar qual o comportamento do mesmo face à absorção de água.

Com a Figura 72 pretende-se apenas demonstrar que existe uma absorção contínua de água por capilaridade até que se atinge um ponto em que o nível de água restante é demasiado baixo para a absorção continuar à mesma velocidade. É claro que um solo seco absorve a água muito rapidamente e à medida que o seu teor em água aumenta, a velocidade de absorção diminui.

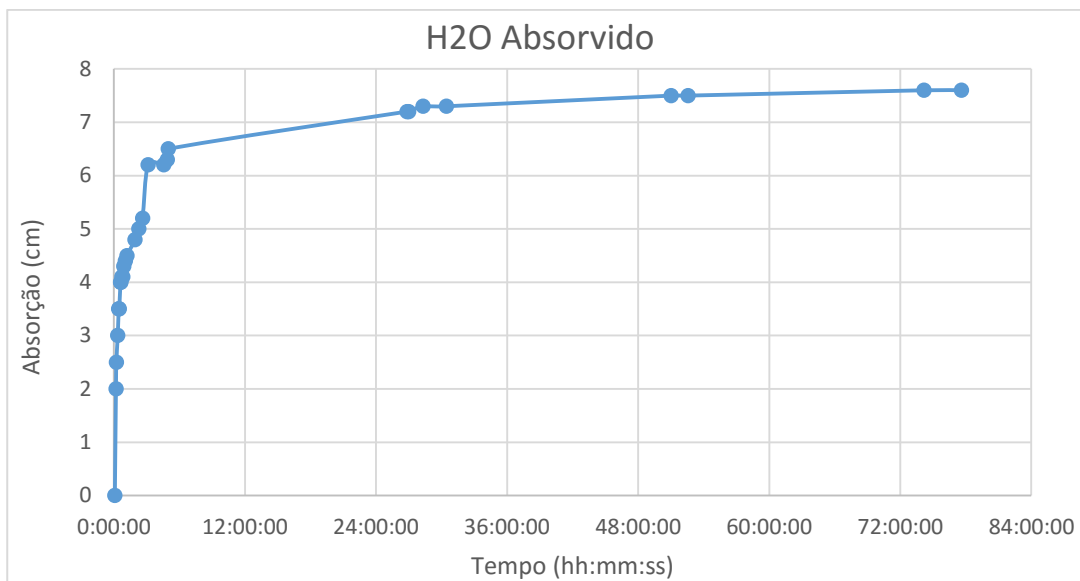


Figura 72 - Água absorvida

Os valores retirados do defletómetro estão a crescer com o tempo, mas neste caso, isso significa que a superfície do solo está a descer em cota. O que se observa é que ao longo do tempo, é que o solo tem tendência a colapsar quanto mais água é absorvida até que chega a um ponto estável.

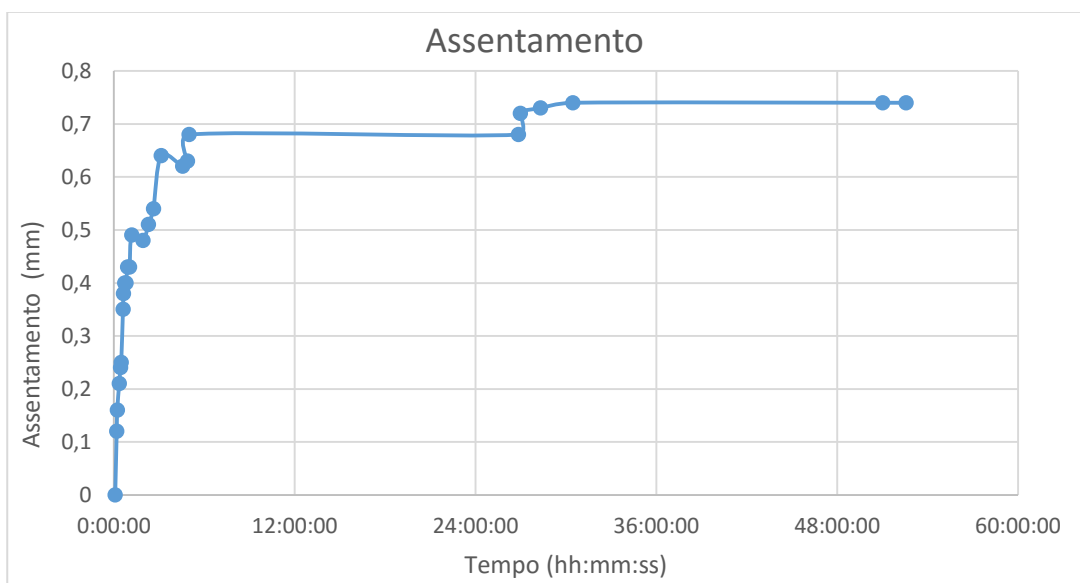


Figura 73 - Dados do defletómetro

Aquando a interpretação dos dados de resistividade é sugerido, que uma consolidação do solo podia justificar o porquê de haver um aumento de resistividade em alguns períodos. Não é possível, com estes dados determinar quais camadas consolidam, mas deduz-se que, se existe mais água nas camadas de baixo, e se são essas em que as variáveis variam mais, a consolidação

deve ser maior aí também. Nota-se que estes dados não provam a teoria, mas fomentam a mesma.

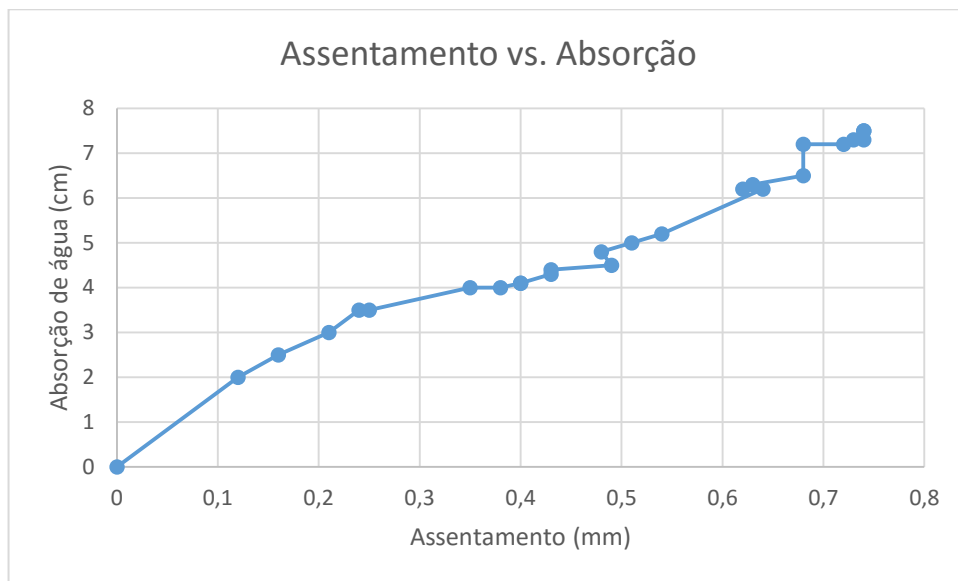


Figura 74 - Assentamento vs. absorção

A relação entre a absorção de água por capilaridade no solo e o assentamento medido (Figura 74) é clara. À medida que a água ascende no solo, deve lubrificar os grãos e provocar um empacotamento levando à redução do índice de vazios. Faz sentido que quanto mais água for absorvida pelo solo maior a lubrificação e maior o volume de solo afetado por este efeito. Neste fenómeno o ar é expulso e os vazios preenchidos com líquido são rearranjados.

7.3.4. Correlações

Neste subcapítulo interpretam-se os dados utilizando o programa TANAGRA. Tenta-se determinar, de um modo mais seguro do que apenas observar gráficos, que variáveis se relacionam e tenta-se justificar esse comportamento.

Nota-se que os dados "Ro" são as resistividades, "deslocamento" são os valores do defletómetro, "vp" são as velocidades de ondas P medidas e "DRo" são as diferenças dos valores de resistividade.

Projetando todas as variáveis nos dois eixos principais e as suas correlações depois duma análise de fatores principais obtém-se o seguinte diagrama de dispersão.

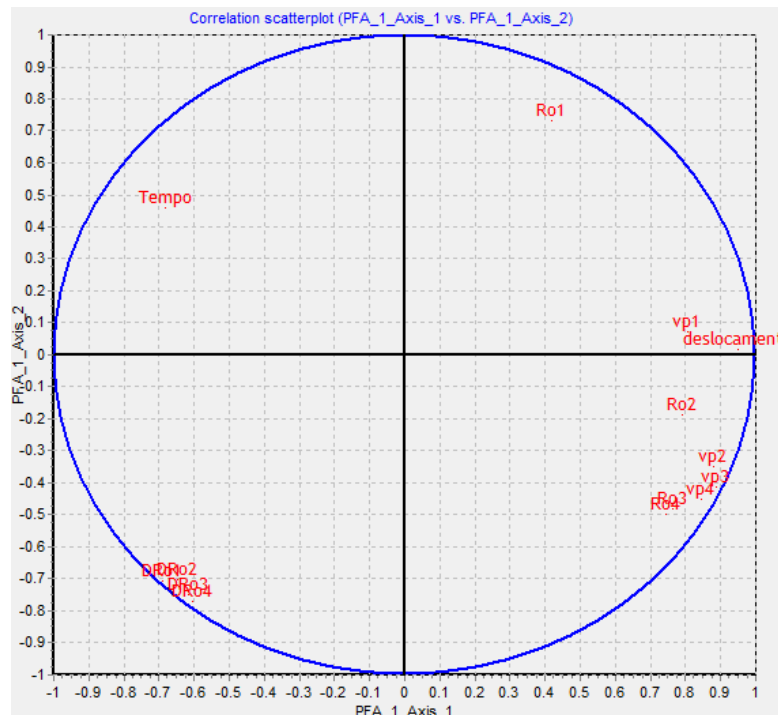


Figura 75 - Diagrama de dispersão - Todos os dados - 1º Ensaio

Observa-se que, como seria de esperar, os valores de vp2, vp3 e vp4, juntamente com Ro3 e Ro4 e de certo modo Ro2, têm uma relação inversamente proporcional com o tempo e correlacionam-se todos entre si. Isto acontece porque as variações são graduais no tempo, não são bruscas e comportam-se todas dum modo semelhante. No entanto deve-se reparar que o Ro2 está afastado do agrupamento. Supõe-se que se observa este comportamento devido à natureza mais violenta da descida da resistividade na segunda camada e posterior subida como já foi referido, ao passo que em Ro3 e 4 tal não é tão evidente e nas velocidades inexistente. Por esta lógica pode-se argumentar que Ro1 tendo o comportamento mais violento de queda e sendo o que sofre também depois uma subida mais notória seria a variável mais isolada. Tal observa-se estando Ro1 sozinho no diagrama. Vp1 está também isolado apenas correlacionando com o deslocamento. A possibilidade de verificar esta correlação é de extrema importância. Sugere que de facto Vp1 tem um comportamento semelhante à consolidação do solo que está totalmente ligada à quantidade de água que é absorvida. Deste modo pode-se extrapolar que vp1 varia apenas e só com o teor em água. As outras variáveis não têm este comportamento porque é apenas na camada inferior que se tem uma situação em que a única variante é a água e não se precisa de lidar com os efeitos das outras camadas como por exemplo a água estar a subir por capilaridade para a camada 2 ou 3 mas estar a haver consolidação em baixo. A razão pela qual Ro1 não apresenta o mesmo comportamento está relacionado com o facto de não ser uma variável com comportamento

unidirecional, decresce e depois aumenta. Para estudar a relação de Ro1 com o deslocamento e com vp1 optou-se por dividir os dados a meio. Uma parte em que a resistividade na camada inferior tem carácter decrescente e outra em que cresce.

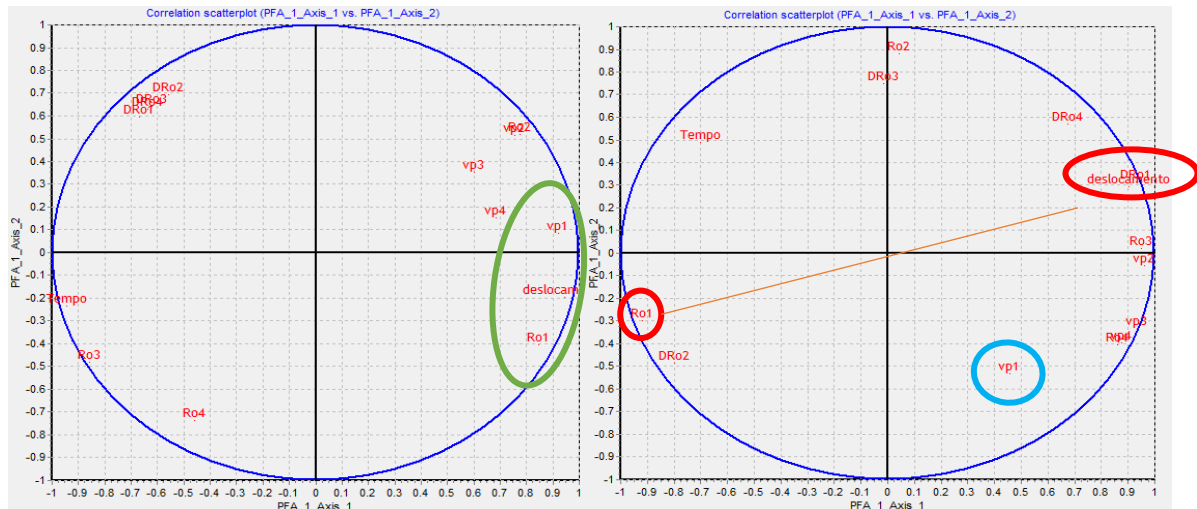


Figura 76 - Diagramas de dispersão – à esquerda, queda de resistividade; à direita, aumento de resistividade

Olhando agora para estas representações pode-se confirmar que existe alguma correlação entre Ro1 (resistividade na camada mais profunda) e o deslocamento medido. No diagrama da esquerda a relação não é tão evidente porque trata-se da porção dos dados em que a resistividade ainda está a ser afetada, neste caso a diminuir, pelo aumento do teor em água do solo. É apenas no diagrama da direita, quando se pensa que a variação de resistividade é influenciada apenas pela contínua consolidação do solo, que se prova que realmente estes valores estão totalmente dependentes um do outro. Rodeados a vermelho, encontram-se o deslocamento com a variação das resistividades na camada mais profunda e do outro lado, apenas os valores de resistividade. Prova-se que a variação e o deslocamento estão absolutamente correlacionados pois ocupam o mesmo lugar no diagrama e, como se seria de esperar, as resistividades estão do lado oposto do mesmo, também junto ao círculo exterior, que representa uma correlação quase perfeita inversamente proporcional. Vp1, no diagrama da direita encontra-se totalmente isolado da resistividade e do deslocamento porque não é afetada pelo efeito de consolidação. No entanto, continua a variar numa correlação negativa com o tempo.

7.3.5. Porosidade e Grau de Saturação a partir de Velocidades P e Resistividade

Como referido no capítulo 21 vários autores estudaram a possível determinação da porosidade ou de índice de vazios a partir das medições não invasivas e in-situ de resistividade e de primeiras

chegadas das ondas sísmicas P e S. Neste capítulo concentra-se a atenção no trabalho de (Cosentini & Foti, 2014) onde foi obtido um modelo matemático que correlaciona estas variáveis. São então projetados os dados de velocidade de ondas P contra resistividade obtidos neste trabalho nos diagramas calculados para solos arenosos no trabalho de (Cosentini & Foti, 2014) previamente apresentados (Figuras 77 e 78).

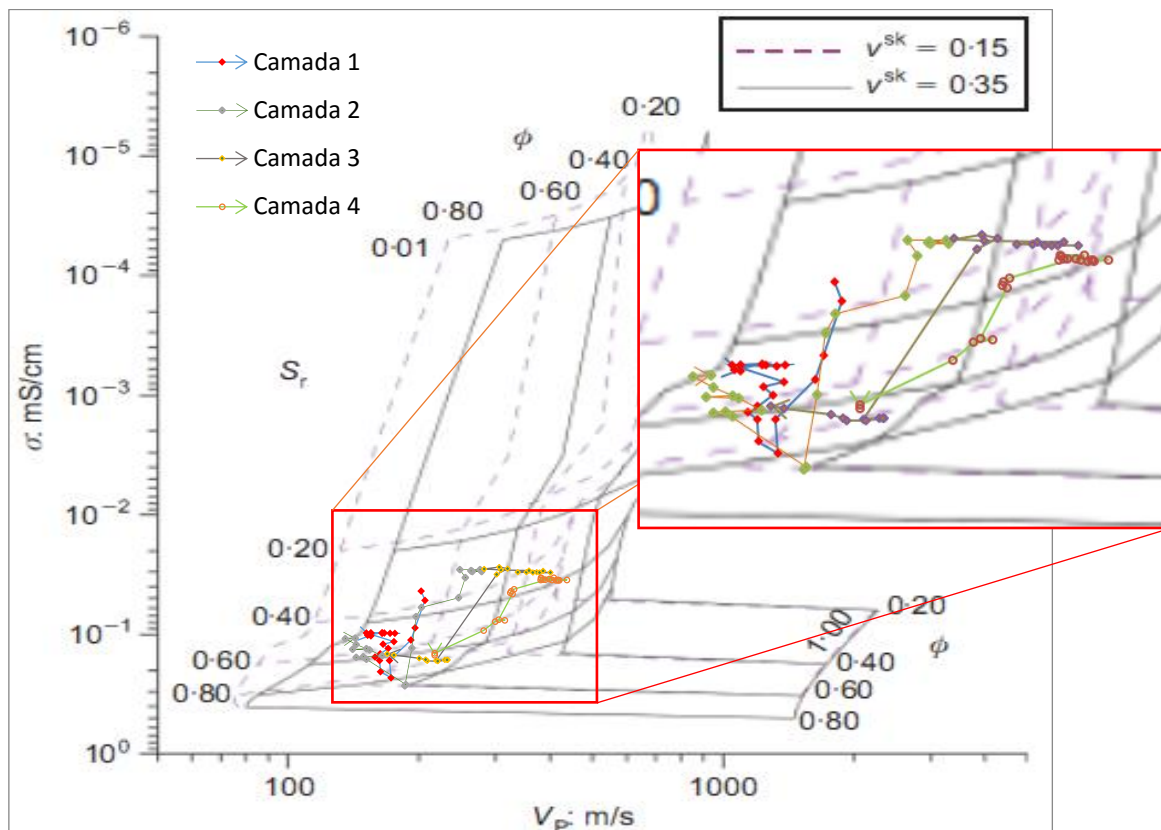


Figura 77 - Primeiro diagrama calculado por (Cosentini & Foti, 2014) com dados de velocidade P e resistividade

Observando a Figura 77 confirma-se que os dados obtidos caem na gama de dados com que os modelos são calculados. À medida que o solo é humedecido verifica-se um aumento de grau de saturação em todas as camadas. Isto acontece porque as linhas de saturação são verticais com uma ligeira inclinação. Ou seja, à medida que a resistividade diminui, ou no caso do gráfico, a condutividade aumenta, o grau de saturação decresce. A velocidade também sofre um decréscimo o que estranhamente, neste diagrama implica uma subida de porosidade. Se observarmos com cuidado verifica-se que em todas as camadas quando, quando se dá a subida de resistividade que anteriormente se pensou que seria devido a uma consolidação (diminuição da porosidade), a velocidade continua a diminuir o que leva a um paradoxo onde, segundo o diagrama, a porosidade aumenta e o grau de saturação diminui, o que não faz sentido. Pode-se

pensar que à medida que existe um ligeiro assentamento, o grau de saturação diminui porque os próprios poros ficam mais pequenos e a água pode ser expelida, mas o grau de saturação neste caso manter-se-ia igual. Não se deve confundir com teor em água. Mas deve-se lembrar que este diagrama não foi construído para o nosso solo. Por isso projetam-se os dados também na Figura 78 para haver uma comparação.

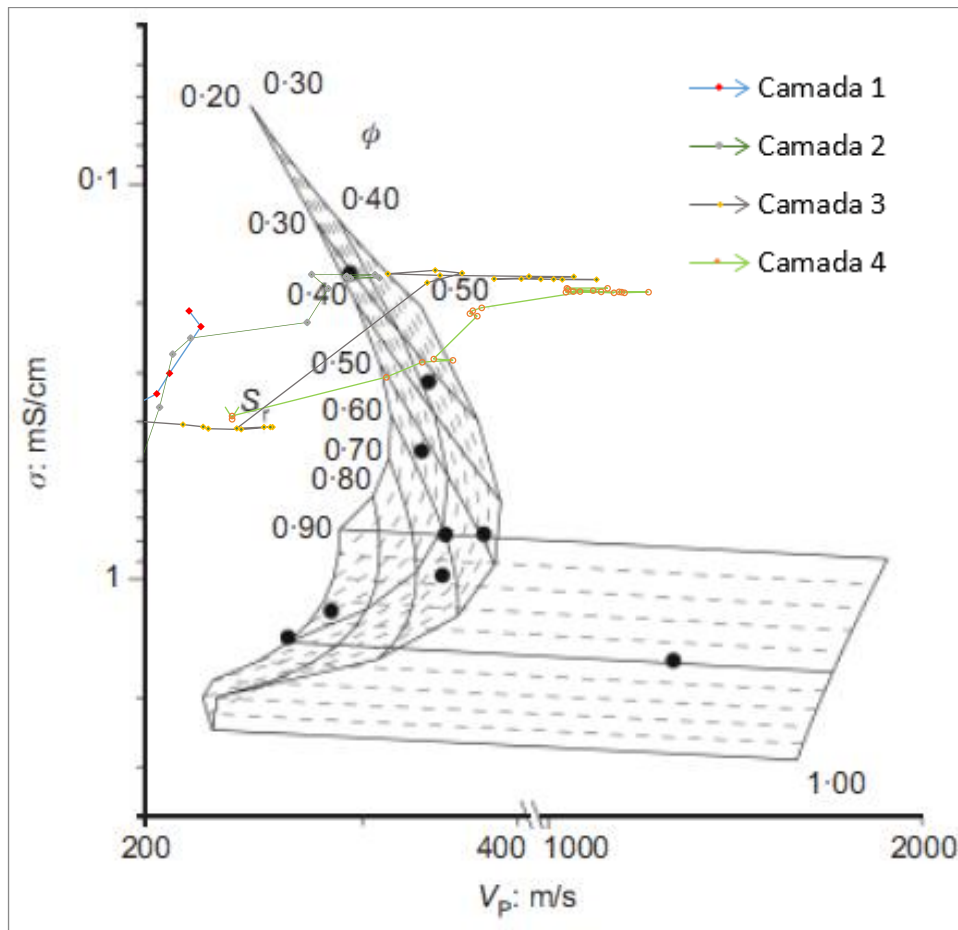


Figura 78 - Segundo diagrama calculado por (Cosentini & Foti, 2014) com dados de velocidade P e resistividade.

Este diagrama foi desenhado para um solo obtido pelos autores e com os parâmetros mecânicos que eles determinaram experimentalmente. Neste caso pode observar-se que o comportamento do diagrama é totalmente diferente do anterior. Projetando os dados do trabalho neste diagrama pode-se verificar que o comportamento seria bastante diferente o que, no mínimo, comprova que os diagrama, dependendo dos dados inseridos, variam bastante. É esse o objetivo deste capítulo, demonstrar que seria possível aplicar este método aos dados obtidos. Num trabalho futuro seria interessante obter os parâmetros mecânicos do modelo do solo em estudo.

7.4. Sequência de humedecimentos e estabilização

Como explicado no Capítulo 6.4., após as 190h de absorção de água decidiu-se colocar mais água no lado vazio do tanque. Esta água foi colocada em três fases diferentes, 150l, 105l e finalmente 180l com tempos de espera variantes. No final removeu-se toda a água não-absorvida e continuaram-se a fazer medições para estudar o comportamento do solo nesta situação. Os gráficos apresentados representam essa sequência de eventos. A cada camada corresponde uma cor no gráfico e os diferentes eventos são representados por diferentes tons. Todos os gráficos são acompanhados duma legenda para auxiliar a sua interpretação.

7.4.1. Resistividade

Apresentam-se os valores calculados de resistividade em regime subsaturado e em drenagem por voltas das 240 horas.

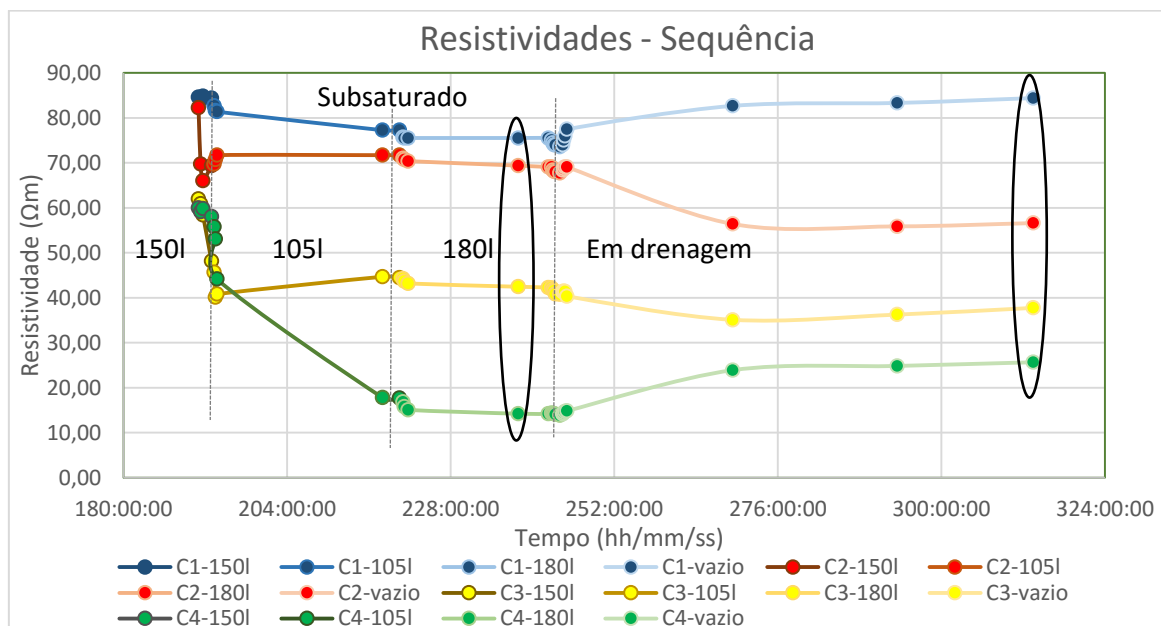


Figura 79 - Resistividades – sequência

Tendo em consideração que as camadas inferiores já estavam com valores mínimos esperados de resistividade não se esperaria que houvessem grandes variações. Quando se colocam os primeiros 105l de água no lado vazio do tanque, nota-se um decréscimo dos valores de resistividade em todas as camadas. Esta variação é mais importante nas camadas superiores porque até aqui, estas camadas ainda não estavam tão saturadas como as inferiores. Havendo uma variação negativa nas camadas inferiores demonstra que ainda existiria algum ar nos poros das mesmas que pode ter sido expelido resultando num aumento do grau de saturação. Neste caso não se observam as subidas de resistividade na camada 1, após o humedecimento, como se observaram no ensaio

anterior. Isto não se dá porque possivelmente a camada terá atingido o índice de vazio mínimo. No entanto essa subida verifica-se na segunda camada onde possivelmente ainda existiria espaço intergranular suficiente para se dar uma consolidação natural devido à lubrificação causada pela entrada de mais água. Outra possibilidade pode ser assumir que esta subida verificada na camada 2 pode ser causada pelo escape do ar expelido da camada inferior.

No segundo momento do ensaio colocaram-se mais 150l que teve efeitos diferentes nas variadas camadas. Na camada do fundo observa-se uma contínua, mas lenta diminuição dos valores de resistividade. Tal justifica-se porque o solo deve estar a alcançar finalmente um estado saturado preenchendo apenas os poros com água, libertando o ar. Na segunda camada não se nota alteração nos valores de resistividade. A terceira camada sofre uma subida de resistividade que se justifica da mesma que a subida na camada 2 no momento anterior. A camada 4 continua a ser saturada.

Quando se colocam os 180l de água, para igualar o nível da água no tanque ao do solo, verifica-se uma descida suave nos valores de resistividade em todas as camadas em que se acentua mais na quarta, sendo a menos saturada.

No último momento, ao retirar toda a água do lado vazio do tanque, verificam-se dois comportamentos diferentes. As camadas 1 e 4, sendo a camada mais profundo e a mais superficial, sofre aumentos de resistividade provocados pela diminuição da saturação. Na camada inferior, é provável que exista uma drenagem da água contida nos seus poros pela camada permeável de gravilha que constitui o leito de drenagem do bloco de solo. Diminuindo o grão de saturação a resistividade aumenta. Na camada mais superficial essa subida pode ser atribuída à drenagem da água para camadas inferiores ou a uma evaporação.

Observa-se que quanto mais profunda a camada, maior é o valor mínimo de resistividade. Sendo o solo igual em todo o perfil, se as condições fossem as mesmas (teor em água e índice de vazios), seria de esperar que todas as camadas tivessem um mesmo valor de resistividade mínimo, no entanto tal não se verifica. Uma explicação seria referir que camadas mais profundas são mais afetadas pela entrada de água e, juntamente a uma carga maior provocada pelas camadas suprajacentes, têm tendência a acabar com um índice de vazios menor o que implicaria uma resistividade maior. No entanto, embora esta justificação pareça acertada, e de facto já tenha sido mostrado que o solo tem este comportamento, neste caso não parece ser uma explicação aceitável. Propõe-se antes que este fenómeno ocorre não só devido à lubrificação e posterior consolidação provocada pela entrada da água, mas devido ao estado inicial do solo também. Voltando à Figura 67, onde a camada 1 atinge pela primeira vez valores mínimos de resistividade,

verifica-se que esse valor é à volta dos 39Ωm. Se procurarmos os mínimos de todas as camadas obtemos para as 2, 3 e 4; 34Ωm, 35Ωm e 14Ωm respetivamente. As camadas interiores têm valores semelhantes, mas as da base e topo tomam valores muito diferentes. Se verificarmos, na Figura 79, após a drenagem, verifica-se que quanto mais profunda a camada, maior o valor de resistividade. Pode ser argumentado que o efeito de consolidação precede o atingir do mínimo e por tanto nunca se o atinge realmente e, sendo as camadas mais profundas, mais afetadas por esse efeito, isto poderia ser aceite como explicação. Outra explicação seria o modo como o solo foi preparado. Cada camada foi compactada antes de ser colocada outra por cima, portanto parece correto assumir que as camadas profundas sofreram uma compactação muito mais intensa que as superficiais, estando sujeitas à compactação não só das próprias como das suprajacentes. Num argumento mais conservativo, aceita-se que estas diferenças de mínimos resistivos são causadas por uma conjugação de compactação heterogénea inicial e o efeito de consolidação já abordado.

Para estudar o comportamento da resistividade com a profundidade projetaram-se os dados rodeados a preto na Figura 79, que representam a resistividade antes e depois da drenagem (Figura 80).

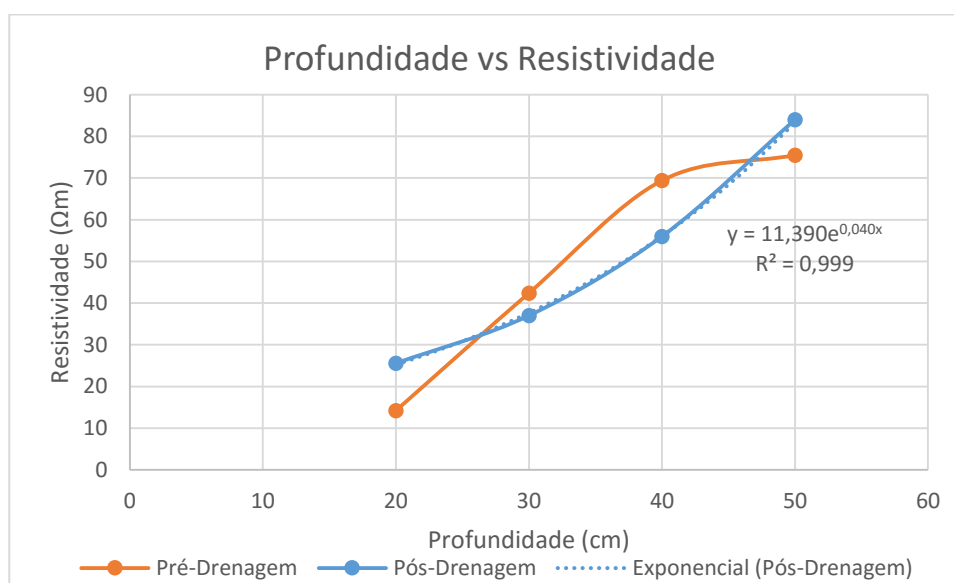


Figura 80 - Valores de resistividade antes e depois da drenagem projetados contra a profundidade.

Em ambas as situações, antes e depois da drenagem, as resistividades medidas ordenam-se crescendo com a profundidade, no entanto, pós-drenagem os dados tomam um comportamento exponencial que sugere que a resistividade exponencia quanto mais profundo for medida. Seja esta relação devido à prévia compactação das camadas, como já explicado, ou devido à

consolidação natural e posterior drenagem, é inconclusivo, mas é importante notar que a relação obtida tem um erro muitíssimo baixo. Por isso, pelo menos para estes dados, obtém-se:

$$\rho = 11.39e^{0.04Prof.} \quad 35$$

Com ρ – resistividade (Ωm) e Prof. – Profundidade (cm).

7.5. Ensaio edométrico

Como já referido, foi feito um ensaio edométrico onde se mediu, ao mesmo tempo que se aplicava carga e se molhava o solo, a resistividade do mesmo. Neste capítulo apresentam-se 2 tipos de gráfico onde se expõem os valores obtidos de modo a facilitar a sua interpretação. O objetivo deste ensaio é confirmar ou desmentir os resultados obtidos no ensaio do tanque.

Nota-se que a apresentação habitual de dados dum ensaio edométrico é assentamento vs. tempo, no entanto neste trabalho não se mediu o tempo pois não existe grande relevância visto não ser esse o objetivo. Em vez disso apresentam-se primeiro os dados num gráfico de assentamento vs. carga.

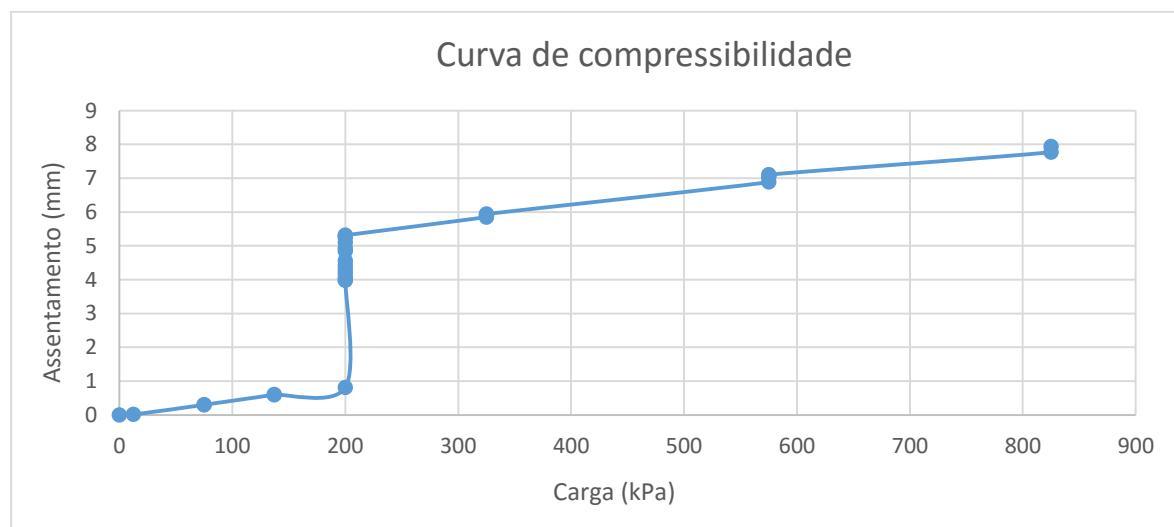


Figura 81 - Ensaio Edométrico - Assentamento vs. Carga

Esta exposição serve apenas para demonstrar que o solo tem um comportamento clássico em que sofrendo uma carga o solo tem um período de assentamento até que se volta a colocar mais carga. O solo tem comportamento colapsável. O verdadeiro interesse deste ensaio encontra-se em observar o comportamento resistivo do solo aquando da compactação. Esta será uma consolidação ou assentamento artificial ao passo que nos ensaios do tanque existe um colapso (consolidação natural) mas projeta-se que o comportamento da resistividade no tanque pode ser estudado também desta maneira porque, essencialmente o que está a acontecer em ambos os

ensaios é uma redução do índice de vazios, seja esta natural ou artificial. Para tal apresenta-se o seguinte gráfico.

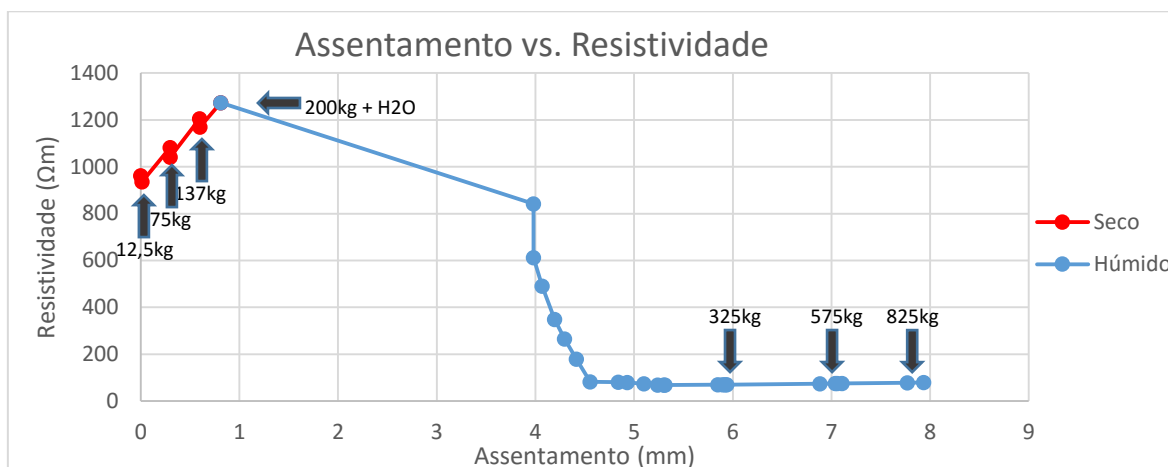


Figura 82 - Ensaio Edométrico - Assentamento vs. Resistividade

A vermelho são os valores de resistividade obtidos enquanto o solo está seco. É curioso que sendo o ar um isolador muito bom, a redução do índice de vazios cause um aumento na resistividade do solo. Uma possibilidade explanatória para este efeito seria assumir que este solo, possuindo 10% de argila, forma caminhos condutores onde esta está conectada. A passagem de corrente faz-se através da continuidade estabelecida através de uma rede condutora de tubos. Quando se carrega diminuiu o índice de vazios e interrompem-se ligações dessa rede e a resistividade aumenta. Depois quando se coloca água no solo o esperado acontece. Apesar de qualquer assentamento a resistividade diminui até um mínimo onde, na Figura 82 parece que se torna estável. Para estudar melhor o comportamento nessa zona, apresenta-se a Figura 83.

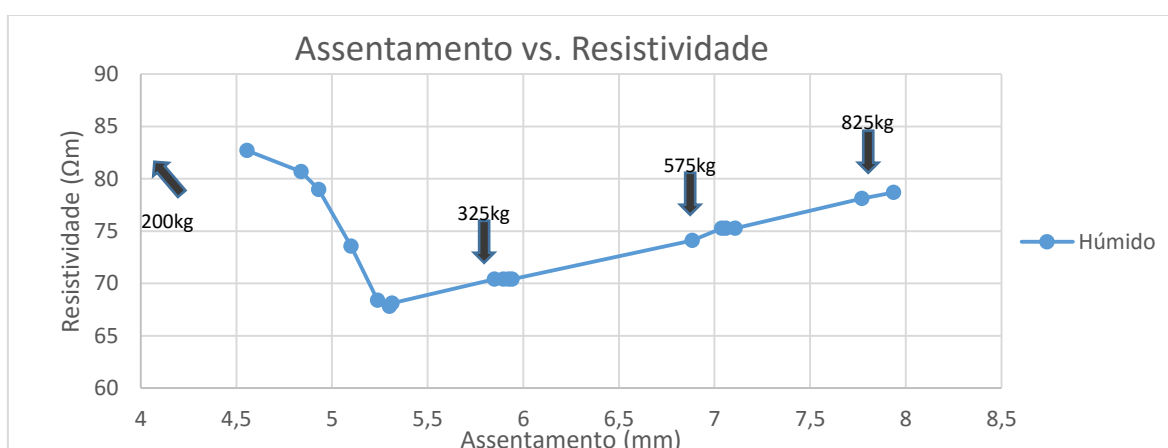


Figura 83 - Ensaio Edométrico - Assentamento vs. Resistividade - (assentamento 4.5-8mm)

Neste gráfico consegue-se observar perfeitamente o efeito obtido nos ensaios no tanque. Após uma queda brusca de resistividade existe um pequeno aumento contínuo com a compactação. Neste caso não se pode atribuir este efeito à lubrificação causada pela água e a consequente consolidação, mas antes à carga aplicada. Parece que assim se prova que a redução do índice de vazios e a consequente expulsão de água (condutor) leva a uma subida nos valores de resistividade do solo. Como era esperado.

7.6. Justificação do comportamento sísmico e resistivo.

Apesar de erros sistemáticos e de uma resolução muito baixa provou-se que a velocidade das ondas P decresce com o aumento do teor em água. A resistividade decresce também. Para decréscimo do índice de vazios (consolidação e compactação) a resistividade aumenta. Para velocidades não existe resolução suficiente para observar o seu comportamento para o grau de consolidação observado. É importante apresentar uma justificação para esses efeitos.

Utiliza-se a Figura 84 para representar os vários ambientes criados por diferentes graus de saturação. Realça-se que a figura é uma representação cruda pois na realidade existem finos que ali não estão representados.

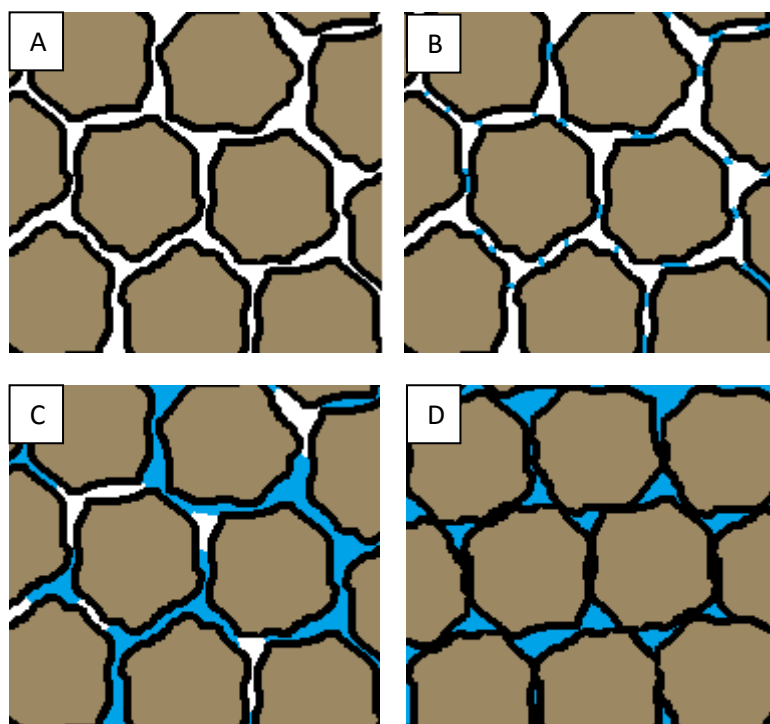


Figura 84 - Vários estágios de saturação do solo

A situação A, representa o solo totalmente seco. Tanto o ar como as partículas sólidas de solo são bastante resistivas, portanto o solo apresenta uma resistividade bastante alta. Quanto à

velocidade de ondas pode-se dizer que o solo, neste estado possui um módulo de rigidez (G) relativamente alto (Volta-se ao trabalho anterior (Baieta, 2015) Figura 20) e uma densidade baixa. Utilizando a Equação 16 para o cálculo de velocidade das ondas P observa-se que esta situação gera um ambiente favorável, pelo menos relativamente, à propagação das ondas e obtêm-se velocidades altas. É necessário utilizar as conclusões do trabalho anterior porque neste trabalho não se tratou de solos secos.

A situação B representa a subida de alguma água por capilaridade, em que, como explicado anteriormente, tem tendência a formar meniscos entre os grãos de solo. Sendo a água muito menos resistiva que o solo ou o ar, a sua presença faz com que as propriedades resistivas do solo diminuam drasticamente. A velocidade tende a aumentar pois encontramos-nos no intervalo de sucção devido ao efeito de pressão negativa, devido à presença da água. O que na realidade acontece é que a coesão aparente do solo aumenta, aumenta o módulo de Rigidez do mesmo sem aumentar muito a densidade. Esta variação leva a uma subida de velocidades. (Figura 25)

A situação C representa o solo com um teor em água com que já se trabalha neste projeto. Neste caso, a água presente no solo é suficiente para haver caminhos de menor resistividade apesar de ainda existir ar no solo. É aqui que se observa a lenta estabilização dos valores de resistividade. O efeito de sucção já não acontece, neste momento existe demasiada água para se formarem meniscos que resultam em coesão. Neste caso a água funciona como lubrificante entre as partículas conferindo ao solo um estado muito mais maleável e, para além da densidade do mesmo aumentar, junta-se à descida drástica de tanto o módulo de Rigidez como do Volumétrico e subida da densidade que resulta numa descida das velocidades medidas. Tal resultado é concordante com os resultados obtidos no trabalho prévio.

A situação D representa um solo totalmente saturado. Na realidade, neste trabalho não se obtém este estado mas deve-se notar que se trabalha com o ambiente entre C e D. O que acontece nesta situação é que o solo, devido ao peso próprio e à lubrificação constante das partículas tem tendência a consolidar ligeiramente. Parece que esta consolidação também é auxiliada devido às constates batidas no lado do tanque devido às medições de sísmica. Havendo um solo mais compactado implica que a porosidade diminui, ou seja, o espaço entre os poros é mais pequeno e força expulsão de alguma água. Mesmo tendo uma relação água/ar nos poros maior, a relação água/partículas diminui o que implica que a razão isolante/condutor aumenta. A condução elétrica é provavelmente também auxiliada, a um grau desconhecido, pelas argilas que formam a matriz do solo. O fecho dos poros devido à consolidação leva à perda de conectividade entre os poros e os “caminhos” condutivos, sejam estes formados pelo eletrólito, pelas argilas ou por

ambos, tornam-se mais raros o que leva a um aumento de tortuosidade. Interpretando a Equação 3 da Lei de Archie e considerando a saturação do eletrólito (S^{-m}) a sua condutividade (ρ_w) constante, percebe-se que um aumento de tortuosidade (a) e uma diminuição de porosidade (ϕ) resulta num aumento de resistividade. Lentamente observa-se uma subida de resistividade devido a esta situação. Para as velocidades, seria de esperar que com a densidade continuamente a aumentar em denominador e os parâmetros geotécnicos a diminuir em numerador que a estas diminuíssem continuamente. Pois é exatamente isso que se observa.

8. Conclusões

Neste trabalho variou-se o nível freático num tanque com um solo arenoso com silte e argila preparado para absorver água, por baixo, por capilaridade e fizeram-se medições de resistividade, velocidade de propagação de ondas P e assentamentos ao longo do tempo e da profundidade no solo num conjunto de ensaios: caracterização da situação de referencia, nível freático pelo primeiro nível de medição, o mesmo no segundo e quarto níveis, colocação do nível freático à mesma cota que o topo do solo e drenagem.

Demonstrou-se que um solo húmido, sem influências externas, ao longo do tempo seca e diminui o seu grau de saturação aumentando a resistividade do mesmo.

Ao fornecer água ao sistema observou-se que à medida que o grau de saturação dum solo deste tipo aumenta, existe um decréscimo de resistividade e, que essa resistividade decresce muito rapidamente. A velocidade das ondas P tende a decrescer, também, com o aumento do grau de saturação, para solos não secos.

O solo, aquando o aumento do grau de saturação sofre um assentamento, tratando-se dum solo colapsável. Da análise de componentes principais conclui-se que esse assentamento resulta num decréscimo do índice de vazios que por si, resulta num aumento da resistividade como previsto na Lei de Archie. Tal aumento é devido à redução do espaço condutor no solo (razão eletrólito/massa seca) e/ou ao aumento da tortuosidade devido ao fecho de canais condutores. Fez-se também um ensaio edométrico com medição de resistividades que permitiu concluir que o assentamento faz aumentar a resistividade do solo tanto a seco como com água.

Analisando os dados em profundidade conclui-se que ao longo de toda a experiência existe uma relação positiva entre resistividade e profundidade e negativa entre velocidade e profundidade. (Figura 85)

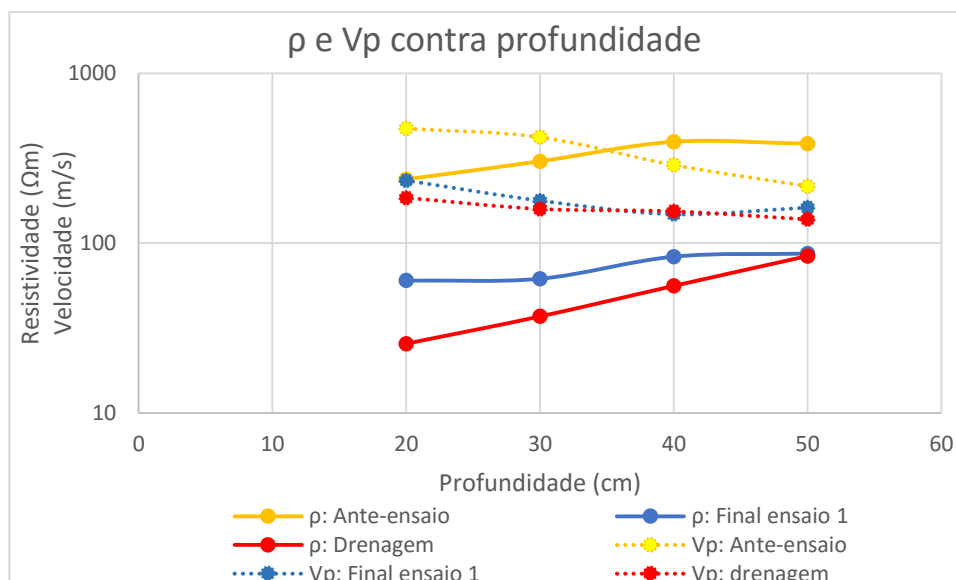


Figura 85 - Resistividade e Velocidade das ondas P, contra a profundidade, em vários períodos da experiência. Ante-ensaio sendo exatamente antes de se colocar água, Final ensaio 1 no final do primeiro ensaio e Drenagem sendo os últimos valores medidos

No final da drenagem encontrou-se uma lei exponencial que relaciona proporcionalmente a profundidade com a resistividade. Poderá estar ligada à diminuição da porosidade e aumento tortuosidade com o aumento da profundidade; o aumento da saturação em profundidade, sem outros efeitos, faria com que a resistividade diminuísse (Equação 3).

As velocidades diminuem em profundidade porque o solo atinge maiores densidades e os parâmetros geotécnicos, módulo de Rigidez e Volumétrico, dos quais a velocidade depende, diminuem devido ao aumento do grau da saturação. (Equação 15).

Conclui-se que o conteúdo em frequência de sinais sísmicos em teor pouco ou muito saturado é variante. Os solos muito saturados apresentam conteúdo em frequência mais baixo do que em solos mais secos.

Em trabalhos futuros dever-se-á utilizar geofones de alta frequência ou *benders* para medir tempos mais precisos quando existem graus de saturação elevados com velocidades muito baixas. Seria interessante também conhecer o grau de saturação em todos os pontos do tempo para poder utilizar valores absolutos e poder determinar relações entre porosidade ou índice de vazios, resistividade, velocidades e assentamentos.

9. Bibliografia

- Aktarakçi, H. (2008). Resistivity Imaging. Madrid: Seminar on resistivity imaging.
- Alvarez, C. (n.d.). *Propriedades físicas e químicas do solo*. Retrieved from Ebah: <http://www.ebah.pt/content/ABAAAAGBoAL/propriedades-fisicas-quimicas-solo>
- Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid to determining some reservoir characteristics. Trans. Am. Inst. Mining, Metallurgical and Petroleum Engrs .
- ARM - *The Architecture for the digital world*. (n.d.). Retrieved from NI-DAQ Interface: <http://www.arm.com/products/tools/streamline-energy-analysis.php>
- Avseth, T. M., & Mavko, G. (2005). *Quantitative Seismic Interpretation: Applying Rock Physics Tools to Reduce Interpretation Risk*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Baieta, R. S. (2015). Caracterização dinâmica geofísica por ondas P e S de solos sobressaturados e sobreconsolidados por dessecação. *Caracterização dinâmica geofísica por ondas P e S de solos sobressaturados e sobreconsolidados por dessecação*. Aveiro, Aveiro, Portugal: Dep. Geociências; Universidade de Aveiro.
- Bastos, Á. d. (93, 9 16). Velocidade de ondas compressionais e cisalhantes como indicadores de litologia e tipo de fluido contido em rochas porosas. Pará.
- Carvalho, J. C., Junior, G. d., Machado, S. L., Mascarenha, M. M., & Filho, F. C. (2015). *Solos não saturados*. São Paulo.
- Conte, E., Consentini, R. M., & Troncone, A. (2009). Shear and dilatational wave velocities for unsaturated soils. . Soil Dynam. Earthquake Engng .
- Cosentini, R., & Foti, S. (2014). *Evaluation of porosity and degree of saturation from seismic and*. Politecnico di Torino: Thomas Telford.
- Cruz, N. B. (2010). Modelling geomechanics of residual soils with DMT tests.
- Direct Industry. (n.d.). Retrieved from <http://www.directindustry.com/prod/megatron-elektronik-ag-co/product-13783-1026753.html>
- Dvorkin, J. P. (2010). Rock Physics Reservoir Characterization.
- Fernandes, M. d. (2012). *Mecânica dos solos - Conceitos e Princípios Fundamentais* (Vol. 1). FEUP: FEUP Edições.
- Fernando Almeida, R. M. (1999). Caracterização dinâmica das areias de Faro através de ensaios sísmicos. Faro.

- Fosco, F. (n.d.). *Mecânica dos Solos I Índices Físicos dos Solos. 3.1 Fases do Solo O solo é formado pelas três fases físicas sólida, líquida e gasosa, distribuídas em.* Retrieved from Slideplayer: <http://slideplayer.com.br/slide/3152965/>
- Fratta, D., Alshibli, K. A., Tanner, W. M., & Roussel, L. (2005). Combined TDR and P-wave velocity measurements for the determination of in situ soil density - – Experimental study. In *Geotech. Test. J. ASTM*.
- Glover, P. (2014). Clay/Shale Effects on Porosity and Resistivity Logs. *Petrophysics MSc Course Notes*(http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earpwjg/PG_EN/CD%20Contents/GGL-66565%20Petrophysics%20English/Chapter%2020.PDF). Leeds: Universidade de Leeds.
- Glover, P. W., Hole, P. J., & Pous, J. (2000). *A modified Archie's law for two conducting phases.* EPSL.
- Hardin, B. O., & Blandford, G. E. (1989). Elasticity of particulate materials.
- Hashin, Z., & Shtrikman, S. (1962). *A Variational Approach to the Theory of the Effective Magnetic Permeability of Multiphase Materials.* Journal of Applied Physics.
- Hoffman, B. A., & Robertson., D. C. (2000). In situ ground freezing to obtain undisturbed samples of loose sand. *J. Geotech. Geoenviron.*
- Hogentogler, C. A. (1937). Engineering Properties of Soil. In *McGraw-Hill Book Company*. Nova Iorque.
- J. A. Santos, A. G. (2000). Shear modulus of soils under cyclic loading at small and medium strain level.
- Kawajiri, S., Sibuya, S., Kato, S., & Kawaguichi, T. (2011). Effects of matric suction on elastic shear modulus for three unsaturated soils. In *Unsaturated soils, proceedings of the 5th international conference on unsaturated soils*. London, UK: Taylor & Francis Group.
- kawatra. (n.d.). Retrieved 10 2016, from hem_eng faculty: http://www.chem.mtu.edu/chem_eng/faculty/kawatra/CM2200_2009_HW_3_sizedist.pdf
- Klein, V. a., & Libardi, P. L. (2002). *Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo.* Ciência Rural, Santa Maria.
- Konishi, C., & Hashimoto, Y. (2016). *The Rock Physics Template to Estimate Clay.* Barcelona, Spain.
- Libardi, P. (1993). *Potenciais de água no solo, série didática no. 007, .* Dpto de Engenharia Rural, Piracicaba, São Paulo.

- Machado, S. L., & Vilar, O. M. (2015). Potenciais da água no solo. In J. C. Carvalho, G. d. Junior, S. L. Machado, M. M. Mascarenha, & F. C. Filho, *Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo - Brasil: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- Mancuso, C., Vassalo, R., & d'Onofrio, A. (2002). *Small strain behavior of a silty sand in controlled-suction resonant column – torsional shear tests*.
- Maquesonda. (n.d.). Retrieved from <http://www.matest.pt/solos.html>
- Marinho, F. A., Crilly, M. S., & Chandler, R. J. (1995). Stiffness measurements on an unsaturated high plasticity clay using bender elements. *Unsaturated soils, proceedings of the 1st international conference on unsaturated soils*. Rotterdam, the Netherlands.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). Fundamentals of soil behavior. Nova Iorque.
- Moreira, G. (2015, Setembro). Avaliação da deformação de um talude em modelo laboratorial. Aveiro, Portugal.
- Oh, W. T., & Vanapalli, S. K. (2011). The relationship between the elastic and shear modulus of unsaturated soils. *Unsaturated soils, proceedings of the 5th international conference on unsaturated soils*. London,: Taylor & Francis Group.
- Orellana, E. (1974). Prospeccion Geoelectrica en corriente contínua. Paraninfo, Madrid.
- Proctor, R. R. (1933). Fundamental Principles of Soil Compaction. . In *Engineering News Record*. Nova Iorque.
- Qian, X., Gray, D. H., & Woods, R. D. (1993). *Void and granulometry*.
- Rafael. (2009, Setembro 28). Retrieved from El Profe de Naturales: <https://elprofedenaturales.wordpress.com/2009/09/28/metodos-sismicos-ondas-p-y-s/>
- Rakotomalala, R. (2005). *TANAGRA : un logiciel gratuit pour l'enseignement et la recherche* (Vol. vol. 2). Retrieved from Oocities: <http://www.oocities.org/athens/forum/5265/subterra.htm>
- Santos, J. A. (2008). Obras Geotécnicas: Compactação. Instituto Superior Técnico.
- Sequinel, G. (2016, Fevereiro 3). *Ensaio Edométrico*, <http://docslide.com.br/documents/ensaio-edometrico.html>. Retrieved <http://docslide.com.br/documents/ensaio-edometrico.html>, from Dockslide.
- Sykora, D. W. (1987). Examination of existing shear wave velocity and shear modulus correlation in soils. US Army Corps of Engineers.

- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University.
- Tuller, M., & Or, D. (2004). Water retention and characteristic curve. In *Encyclopedia of soils in the environment*. Oxford, Reino Unido.
- Vallejo, L. I. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Isabel Capella.
- Vilar, O. M., & Ferreira, S. R. (2015). Solos colapsáveis e expansivos. In J. C. Carvalho, G. d. Junior, S. L. Machado, M. M. Mascarenha, & F. C. Filho, *Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo - Brasil: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- Villar, L. F., Guimarães, R. C., Rodrigues, J. K., Azevedo, R. F., & Carvalho, J. C. (2015). Compactação dos solos: laboratório e campo. In J. C. Carvalho, G. d. Junior, S. L. Machado, M. M. Mascarenha, & F. C. Filho, *Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo – SP - Brasil: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- wikipedia. (n.d.). *Archie's Law*. Retrieved 10 3, 2016, from Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Archie%27s_law
- William Murray Telford, W. M. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- Wu, S., Gray, D., & Jr., F. E. (1984). Capillary effects on dynamic modulus of sands and silts. In *J. Geotech. Engng, ASCE*.

Anexos

10.1. Anexo 1 – Ficheiro de Aquisição em *Labview*

Na primeira coluna estão representados os tempos de aquisição e, nas seguintes cinco, estão representadas as amplitudes de sinal medidas em cada geofone.

0.000000	-0.002571	-0.002242	-0.002242	-0.002242	-0.001913
2.000000E-5	-0.001913	-0.002242	-0.001584	-0.002571	-0.001584
4.000000E-5	-0.001913	-0.001913	-0.001584	-0.001913	-0.001913
6.000000E-5	-0.001913	-0.001584	-0.001913	-0.002242	-0.001584
8.000000E-5	-0.002571	-0.001913	-0.001913	-0.002242	-0.001913
0.000100	-0.001255	-0.001584	-0.002242	-0.001913	-0.001913
0.000120	-0.002571	-0.001913	-0.001913	-0.002242	-0.001584
0.000140	-0.001584	-0.001584	-0.002571	-0.002242	-0.002571
0.000160	-0.001255	-0.001584	-0.002242	-0.002571	-0.001584
0.000180	-0.001913	-0.001584	-0.002242	-0.002571	-0.001584
0.000200	-0.001913	-0.001913	-0.002242	-0.002242	-0.001584
0.000220	-0.001913	-0.001913	-0.001584	-0.002242	-0.001255
0.000240	-0.002571	-0.002571	-0.002242	-0.001913	-0.001913
0.000260	-0.002242	-0.002242	-0.002242	-0.001584	-0.002242
0.000280	-0.001913	-0.001913	-0.002571	-0.002571	-0.002571
0.000300	-0.001913	-0.002571	-0.002571	-0.001913	-0.002571
0.000320	-0.001255	-0.001913	-0.002242	-0.001584	-0.001913
0.000340	-0.001913	-0.001584	-0.001913	-0.001584	-0.002571
0.000360	-0.001913	-0.001255	-0.001584	-0.002571	-0.002571
0.000380	-0.002571	-0.001584	-0.002242	-0.002242	-0.002242
0.000400	-0.002571	-0.001913	-0.001913	-0.001584	-0.002242
0.000420	-0.002242	-0.001255	-0.001584	-0.002571	-0.001584
0.000440	-0.002571	-0.001913	-0.001913	-0.002571	-0.002242
0.000460	-0.001913	-0.001584	-0.002242	-0.001913	-0.001584
0.000480	-0.001913	-0.001913	-0.001584	-0.001584	-0.001913
0.000500	-0.002571	-0.001913	-0.001913	-0.002242	-0.001584
0.000520	-0.002242	-0.001584	-0.001584	-0.001913	-0.001913
0.000540	-0.001584	-0.001913	-0.003886	-0.002571	-0.002242
0.000560	-0.001584	-0.001255	-0.001913	-0.001913	-0.001584
0.000580	-0.002242	-0.002242	-0.001913	-0.001913	-0.001913
0.000600	-0.002242	-0.002242	-0.002242	-0.002242	-0.001913
0.000620	-0.001913	-0.001584	-0.002242	-0.001913	-0.001913
0.000640	-0.002899	-0.001913	-0.001913	-0.002242	-0.001913
0.000660	-0.001913	-0.001913	-0.001584	-0.002242	-0.001913
0.000680	-0.002571	-0.002571	-0.001913	-0.002242	-0.001584
0.000700	-0.001913	-0.001584	-0.001584	-0.002571	-0.001913
0.000720	-0.001913	-0.002242	-0.002571	-0.002571	-0.001913
0.000740	-0.002242	-0.002242	-0.001913	-0.002571	-0.001913
0.000760	-0.001913	-0.001584	-0.001913	-0.002242	-0.001255
0.000780	-0.001913	-0.001584	-0.002571	-0.002571	-0.001913
0.000800	-0.001913	-0.001913	-0.001584	-0.002571	-0.001913
0.000820	-0.001913	-0.001913	-0.002571	-0.001913	-0.001913
0.000840	-0.001913	-0.001913	-0.001584	-0.002571	-0.002242

10.2. Anexo 2 – Função “picking_2d”

```
%picking travel time tomography

clear all
close all
clc

damp=0.0
fescala=1
ensaio='12'
partedossfiches=['a';'b';'c';'d';'e']
geofones=[0 -0.1;0 -0.2;0 -0.3;0 -0.4;0 -0.5]
tiros=[0.40 0;0.3975 -0.1;0.395 -0.2;0.3925 -0.3;0.39 -0.4] % direita
ntiros=length(tiros)

%para tiros deslocados 0.23
triang=ones(ntiros,1)*0.23
tiros(:,1)=sign(tiros(:,1)).*sqrt(tiros(:,1).^2+triang.^2)

plot(geofones(:,1),geofones(:,2),'o',tiros(:,1),tiros(:,2),'*')
axis equal

for tiro=1:ntiros
    ficheiro=strcat(partedossfiches(tiro,:),ensaio,'.lvm')
    M=load(ficheiro) %ficheiro com tempos e traços
    t=M(:,1)%tempo
    M(:,1)=[] % Matriz dos traços

    if tiro==1
        [nl,nc]=size(M)
        MT=ones(ntiros,nc) %inicializa variável Matriz dos tempos

        T=t*ones(1,nc) % matriz dos tenpos
        D=ones(nl,1)*[1:nc]

    end
    figure(1)
    maxm=max(M)
    N=ones(nl,1)*maxm/fescala % Matriz de normalização
    MN=M./N % Matriz dos traços normalizada
    figure(1)
    plot(T,MN+D)

    figure(2)
    [MN]=faz2d(T,MN,D,5)
    figure(1)
    hold on
    plot(T,MN+D)

    %pause
    %hold on
    ylim([0,nc+1])
    tiro
    figure(1)
    [tempos,ccc]=ginput(nc)
    plot(tempos,ccc,'*')
```



```

hold off
MT(tiro,:) = tempos;
%pause
end

MD=MT % inicialização da Matriz das distâncias
PMX=MD %inicialização da Matriz do ponto médio em x
PMY=MD %inicialização da Matriz do ponto médio em z

%Matriz das frações das distâncias dos raios
MFD1=[1/2 1/2 0 0 0 0;1/4 1/2 1/4 0 0 0;1/6 1/3 1/3 1/6 0 0;1/8 1/4 1/4
1/4 1/8 0; 1/10 1/5 1/5 1/5 1/5 1/10];
MFD2=[0 1 0 0 0 0 ;0 1/2 1/2 0 0 0;0 1/4 1/2 1/4 0 0;0 1/6 1/3 1/3 1/6
0;0 1/8 1/4 1/4 1/4 1/8] ;
MFD3=[0 1/2 1/2 0 0 0;0 0 1 0 0 0 ;0 0 1/2 1/2 0 0;0 0 1/4 1/2 1/4 0;0 0
1/6 1/3 1/3 1/6];
MFD4=[0 1/4 1/2 1/4 0 0; 0 0 1/2 1/2 0 0;0 0 0 1 0 0 ;0 0 0 1/2 1/2 0;0 0
0 1/4 1/2 1/4];
MFD5=[0 1/6 1/3 1/3 1/6 0;0 0 1/4 1/2 1/4 0; 0 0 0 1/2 1/2 0;0 0 0 0 1 0
;0 0 0 0 1/2 1/2] ;
MFD=[MFD1;MFD2;MFD3;MFD4;MFD5]
MDC=[] % inicialização da Matriz das distâncias por células

MD=MT
PMX=MD
PMY=MD
contador=0
for tiro=1:ntiros
    for geofone=1:nc
        md=sqrt((tiros(tiro,1)-geofones(geofone,1))^2+(tiros(tiro,2)-
geofones(geofone,2))^2)
        MD(tiro,geofone)=md
        contador=contador+1
        MDC=[MDC ; MFD(contador,:)*md];
        %pause
        PMX(tiro,geofone)=(tiros(tiro,1)+geofones(geofone,1))/2
        PMY(tiro,geofone)=(tiros(tiro,2)+geofones(geofone,2))/2
    end
end

VELO=MD./MT
figure(2)

scatter(reshape(PMX,numel(PMX),1),reshape(PMY,numel(PMY),1),10,reshape(VELO,numel(VELO),1),'fill')

axis normal

mt=reshape(MT,numel(MT),1)
lentidao=inv(MDC'*MDC+damp*eye(6))*MDC'*mt
velocidades=1./lentidao

```

10.3. Valores de Resistência Medidos

Aqui são apresentados os valores originais de resistências medidas antes da transformação em resistividades.

10.3.1. Montagem

Tabela 16 – Resistências (Ω) - Montagem

Ensaio	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
1	413			
2	242	231		
3	225	163	183	
4	218	134,2	84,4	112,3

10.3.2. Primeira secagem

Tabela 17 – Resistências (Ω) – Primeira secagem

Ensaio	Dias	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
5	0	209	121,9	83,1	130,7
6	0	205	120,4	82,4	130,1
7	2	202	117,5	83	135,6
8	3	200	116	84,7	140,8
9	11	204	122,5	97,6	172,5
10	28	181,3	118,8	106,4	199,1
11	33	178,1	119,8	109,7	204

10.3.3. Primeiro humedecimento

Tabela 18 - Resistências (Ω) – Primeiro humedecimento

Ensaio	Tempo	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
12	0:00:00	176,5	122,4	116,1	223
13	0:03:00	93,6	90,3	104,2	215
14	0:13:00	78,3	88,6	103,9	214

15	0:18:00	66,9	88	103,3	213
16	0:26:00	46,5	88,4	103,7	213
17	0:33:00	37	89,7	104,1	214
18	0:43:00	25,2	91,7	104,8	214
19	0:54:00	18,12	92,1	104,6	213
20	1:10:00	20,3	78,8	107,1	216
21	1:54:00	25,1	53,8	107,6	215
22	2:13:00	26,8	45,1	108,8	216
23	2:35:00	28,5	37,7	110,7	218
24	3:06:00	31,6	20,8	115,2	221
25	3:35:00	33	12,43	117	222
26	4:02:00	34,3	10,22	111,4	224
27	4:33:00	35,6	10,41	104,4	225
28	4:51:00	36	10,45	100,2	224
29	26:46:00	42,2	16,85	19,63	179,9
30	27:24:00	42,1	17,25	19,91	177
31	28:10:00	42	17,5	19,86	173,9
32	29:10:00	42,1	17,69	19,9	168,8
33	30:16:00	42,2	18,02	19,86	163,9
34	50:50:00	42,1	20,1	19,37	101,2
35	52:32:00	42,2	20,4	19,52	99,9
36	53:59:00	42,2	20,6	19,98	97,9
37	74:08:00	42,7	22,3	20,5	82,6
38	77:35:00	42,5	22,6	20,9	80,5
39	170:07:00	40,6	24,9	21,8	53,6
40	190:12:00	40,1	25,2	22,3	51,6

10.3.4. Sequência de humedecimentos e estabilizações

Tabela 19 – Resistências (Ω) – Segundo e posteriores humedecimentos

Ação	Ensaio	Tempo	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
Pós 150l	41	191:00:00	39,1	24,9	22,4	51,4
	42	191:18:00	38,8	21,1	22	50,7
	43	191:39:00	39,2	19,99	21,1	51,3
	44	192:54:00	39	21	17,41	49,8
Pós 105l	45	193:17:00	38,2	21,1	16,5	47,8
	46	193:28:00	37,7	21,4	14,5	45,5
	47	193:42:00	37,6	21,7	14,75	37,9
	48	218:00:00	35,7	21,7	16,14	15,25
	49	220:30:00	35,7	21,7	16,07	15,19
Pós 180l	50	221:00:00	35	21,5	15,99	14,46
	51	221:10:00	34,9	21,4	15,79	13,55
	52	221:46:00	34,9	21,3	15,6	12,92
	53	237:53:00	34,9	21	15,34	12,19
	54	242:19:00	34,9	20,9	15,28	12,18
	55	242:48:00	34,7	20,9	15,24	12,33
	56	243:00:00	34,4	20,7	15,08	12,25
	57	243:11:00		20,6	15,01	12,18
	58	243:22:00			14,76	12,04
	59	244:02:00	34	20,5	14,74	11,89
Vazamento	60	244:26:00	34,2	20,7	14,93	12,15
	61	244:34:00	34,7	20,8	14,98	12,36
	62	244:46:00	35,1	20,9	14,97	12,61
	63	245:03:00	35,8	20,9	14,58	12,72
	64	269:23:00	38,2	17,07	12,68	20,5
	65	293:32:00	38,5	16,91	13,1	21,3
	66	313:28:00	39	17,13	13,64	22

10.3.5. Edômetro

Tabela 20 - Edômetro – Carga (kPa), assentamento (mm) e resistências (Ω)

Estado	Carga	Assentamento	Resistência	
Seco	0	0	3360	
	12,5	0,013	3270	
	75	0,3	3780	
		0,3	3640	
	137	0,597	4210	
		0,601	4090	
	Húmido	200	0,81	4450
			3,98	2940
			3,98	2140
			4,068	1716
4,193			1218	
4,295			928	
4,416			626	
4,556			289	
4,839			282	
4,93			276	
5,099			257	
5,238			239	
5,3			237	
5,314			238	
325		5,849	246	
		5,897	246	
		5,923	246	
		5,941	246	
575	6,884	259		
	7,038	263		
	7,06	263		
	7,108	263		
825	7,77	273		
	7,936	275		